



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
POSGRADO EN INGENIERÍA

RESPUESTA SÍSMICA DE UN MODELO ESTRUCTURAL CONTROLADO
CON AMORTIGUADORES MAGNETO-REOLÓGICOS

Tesis que para obtener el grado de Maestra en Ingeniería
(Estructuras)
presenta

MARCELA ELVIRA BAENA RIVERA

Director de tesis Dr. José Alberto Escobar Sánchez

México D.F., septiembre de 2005



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

AGRADECIMIENTOS

Me he doblado y he tocado con mis rodillas el suelo y mis ojos cansados y nublados de impotencia se han vuelto a la tierra, pero no me he caído. Hoy me siento liviana, con mis manos extendidas, con mis ojos atravesando cuerpos para mirar almas, desarmada, con la fuerza en mi mente, en mi espíritu.

Agradezco a Dios todo, lo bueno y lo malo, por lo que he llorado y por lo que he reído, por mis triunfos y por los que no lo han sido, por lo que quiero y por lo que quisiera no recordar, por el amor y el desprecio, por los obstáculos que están en mi camino y por darme fuerza para vencerlos, por la simplicidad de las cosas que me hacen feliz, por los días en que el cielo refleja mi ánimo y por los que le ruego que no me abandone en mi melancolía.

Agradezco a mi familia su apoyo constante, su positivismo, su fuerza, su entrega, su confianza. Exalto la sabiduría de mi papá Darío de la Cruz Baena, la seguridad de mi mamá Luz Amparo Rivera, de mis hermanos Rubén Darío Baena su liderazgo y Jairo Alonso Baena su alegría y ternura. Les agradezco el ser una familia diferente, incomparable. Les agradezco la locura que nos une.

Agradezco al Dr. José Alberto Escobar Sánchez la tutoría en la elaboración de esta tesis.

Agradezco al Dr. Luís Álvarez Icaza, al M.I. René Jiménez y la M.I. Cecilia Cornejo, sus asesorías y comentarios en el desarrollo de este trabajo.

Agradezco al Instituto de Ingeniería UNAM el apoyo académico y económico en mi formación como Maestra en Ingeniería.

Agradezco a Wilhelm Morales Avilés el compartir conmigo mis delirios y ser parte de ellos.

A mis padres y hermanos

CONTENIDO

RESUMEN.....	V
ABSTRACT.....	V
CONTENIDO	VI
CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN.....	1
1.1 ANTECEDENTES	2
1.2 OBJETIVOS Y ALCANCES	4
CAPÍTULO 2. CONTROL DE LA RESPUESTA SÍSMICA DE ESTRUCTURAS.....	5
2.1 CONTROL PASIVO, ACTIVO, HÍBRIDO Y SEMIACTIVO	5
2.2 DISIPADORES DE ENERGÍA SÍSMICA.....	5
CAPÍTULO 3. AMORTIGUADORES MAGNETO-REOLÓGICOS, AMR	7
3.1 CARACTERÍSTICAS DE LOS FLUIDOS MAGNETO-REOLÓGICOS, MR.....	7
3.2 DESCRIPCIÓN DE LOS AMR	9
3.2.1 Características de un AMR	10
3.2.2 Comportamiento de los AMR	11
3.2.2.1 <i>AMR en estado pasivo</i>	11
3.2.2.2 <i>AMR en estado semiactivo</i>	14
3.2.3 Diseño de los AMR.....	16
CAPÍTULO 4. CONTROL ACTIVO DE ESTRUCTURAS	21
4.1 INTRODUCCIÓN AL CONTROL ACTIVO	21
4.2 APLICACIÓN DEL CONTROL ACTIVO A ESTRUCTURAS	23
4.3 EJEMPLO DE CONTROL ACTIVO DE UN MARCO SIMPLE.....	31
CAPÍTULO 5. DISEÑO SÍSMICO DE ESTRUCTURAS CON AMR.....	34
5.1 DISEÑO SÍSMICO ESTRUCTURAL CONVENCIONAL	34
5.2 ALTERNATIVAS DE DISEÑO SÍSMICO DE ESTRUCTURAS CON AMR.....	35
5.3 PROPUESTA DE DISEÑO SÍSMICO DE ESTRUCTURAS CON AMR	37
CAPÍTULO 6. APLICACIÓN DE UN AMR A UN MODELO ESTRUCTURAL	39
6.1 DESCRIPCIÓN DEL MODELO ESTRUCTURAL ESTUDIADO	39
6.2 ANÁLISIS ESTRUCTURAL DEL MODELO CONTROLADO CON AMR.....	41
6.2.1 Propiedades estructurales	42
6.2.2 Descripción del AMR empleado y ubicación en el modelo estudiado.....	44
6.2.3 Registros sísmicos considerados	47
6.2.4 Calibración del modelo analítico estudiado	48
6.2.4.1 <i>Formas y frecuencias modales</i>	49
6.2.4.2 <i>Resultados de la calibración</i>	49
6.2.5 Modelo analítico convencional y modelo controlado con AMR	49
6.2.5.1 <i>Envoltentes de desplazamientos de piso, distorsiones y fuerzas cortantes de entrepiso</i>	51

6.2.5.2	<i>Cortantes basales del modelo estudiado controlado</i>	55
6.2.5.3	<i>Historias de desplazamientos de piso y fuerzas cortantes de entrepiso</i>	55
6.2.5.4	<i>Amortiguamiento viscoso equivalente</i>	60
6.3	APLICACIÓN DE LA PROPUESTA DE DISEÑO SÍSMICO DE ESTRUCTURAS CON AMR AL MODELO ESTUDIADO	61
6.3.1	Envolventes de desplazamientos de piso, distorsiones y fuerzas cortantes de entrepiso	61
6.3.2	Historias de desplazamientos de piso y fuerzas cortantes de entrepiso	62
6.3.3	Elementos mecánicos	62
6.4	ESTRUCTURAS CONTROLABLES CON AMR	70
	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	75
	REFERENCIAS	77

RESUMEN

La preocupación constante por los efectos que pueden ejercer las fuerzas sísmicas en los edificios amenazando su integridad, ha inducido el diseño de sistemas que reaccionen de forma inmediata con el movimiento sísmico, regulando la respuesta de los edificios e impidiendo su daño.

En la actualidad, se han propuesto múltiples dispositivos disipadores de energía para proteger las estructuras contra acciones sísmicas intensas, reduciendo desplazamientos y mitigando daños. Estos dispositivos pueden clasificarse en sistemas de control pasivo, activo, semiactivo e híbridos.

En el presente trabajo se estudia el comportamiento estructural del modelo analítico de la estructura de un edificio de cinco pisos en la que se utilizan dispositivos de control, denominados amortiguadores magneto-reológicos, AMR, para controlar su respuesta sísmica. Estos amortiguadores se ubican dentro del grupo de sistemas de control semiactivo. Están constituidos por fluidos controlables, capaces de cambiar sus características reológicas ante campos magnéticos, permitiendo modificar las propiedades dinámicas de la estructura.

Se analiza y se discute la respuesta analítica de modelos estructurales con AMR en estado pasivo y semiactivo, respecto a la de modelos sin control, sometidos a excitaciones sísmicas intensas. Se comenta sobre la conveniencia del uso de estos dispositivos con el propósito de preservar el buen estado estructural de los edificios sometidos a fuertes movimientos sísmicos.

ABSTRACT

The continuing concern of the effects that the seismic forces can cause on the buildings, threatening its integrity, has induced the design of systems that react in an immediate way with the seismic movement, regulating the building response and avoiding its damage.

At the present time, multiple energy dissipating devices have been proposed to protect the structures against intense seismic actions, reducing displacements and mitigating damage. these devices can be classified as passive, active, semiactive and hybrid control systems.

The present paper studies the structural behaviour of the analytical model of the five storey building structure in which control devices are used, denominated magnetorheological dampers, AMR, to control its seismic response. These dampers are classified in the group of semiactive control systems. They are constituted by controllable fluids able to change their rheological characteristics when exposed to magnetic fields allowing to modify the dynamic properties of the structure.

The analytical response of the structural model with AMR in passive and semiactive state with respect to models with no control, subjected to intense seismic excitations is analyzed and discussed. The convenience of the use of these devices to preserve the good structural state of the buildings subjected to intense seismic movements is commented and discussed.

CAPÍTULO 1 INTRODUCCIÓN

En todo el planeta continuamente ocurren eventos sísmicos de diferente magnitud. Sin embargo, a lo largo de la historia ha habido sismos con intensidades tan altas que devastan construcciones y arrasan con poblaciones humanas.

Uno de los principales objetivos de la ingeniería estructural es diseñar y construir estructuras capaces de soportar acciones sísmicas y con ello proteger la vida. Para este fin se han planteado múltiples alternativas consignadas en reglamentos de construcción. Con ellas se han establecido métodos de diseño sísmico que proporcionan a las estructuras propiedades que buscan disminuir su vulnerabilidad ante tales movimientos. Los primeros diseños estructurales de la humanidad se basaban en construir edificaciones con diseños muy conservadores, esto es, estructuras muy robustas con comportamientos elásticos pero susceptibles a fallas frágiles. En la actualidad, realizar una estructura de ese tipo llevaría a costos muy altos. Por lo tanto, hoy se realizan diseños de estructuras inelásticas que puedan aceptar daño. Sin embargo, el problema radica en el total desconocimiento de las características del próximo terremoto, principalmente en sitios donde el peligro sísmico es mayor y pueden presentarse intensidades catastróficas.

Además de los métodos convencionales de diseño, se han desarrollado dispositivos que se instalan en la estructura y cuya función es disipar parte de la energía que el sismo le imparte. Estos dispositivos son conocidos y utilizados para la protección de estructuras, y pueden ser disipadores de energía pasivos o activos.

En el presente trabajo se estudia un tipo de dispositivo llamado semiactivo. Estos son amortiguadores que portan un fluido denominado magneto-reológico, MR, que tiene la facultad de cambiar sus propiedades mecánicas ante un campo magnético. Esto es, pasa de un estado líquido a semisólido en milisegundos adquiriendo una resistencia al corte, apto para ser usado en la disipación de energía sísmica de las estructuras.

Las propiedades de estos amortiguadores magneto-reológicos, AMR, pueden controlarse en tiempo real con algoritmos. Ofrecen la ventaja de disipar gran cantidad de energía sin permitir daño estructural.

Aunque en el mundo ya existen edificios controlados con AMR, no existe un reglamento de diseño sísmico que incluya su uso. Esto es debido a que los estudios acerca de estos amortiguadores para la protección estructural son recientes.

En México existe poca información y estudios acerca del comportamiento de este tipo de dispositivos en estructuras. Además, no existen recomendaciones o especificaciones en los reglamentos de construcción nacionales que los consideren en el diseño sísmico.

Por lo tanto, en este trabajo surgió la conveniencia e interés de estudiar la respuesta sísmica de estructuras controladas con AMR bajo las condiciones propias de nuestro medio. A partir de este estudio pudo conocerse la efectividad de estos disipadores de energía en la reducción de las respuestas o del daño estructural. Dicha efectividad pudo comprobarse a partir de la comparación y discusión de las respuestas estructurales de un modelo controlado y uno convencional (sin control).

Adicionalmente, se propuso una alternativa de diseño sísmico de estructuras con AMR. Esta propuesta se aplicó al modelo estructural de un edificio de acero de 5 pisos.

1.1 ANTECEDENTES

El desarrollo de los fluidos magneto-reológicos, MR, data de los años 40 (Winslow, 1949; Rabinow, 1948). En ese entonces, este fluido tuvo poca acogida y confianza de sus propiedades. Recientemente se han desarrollado investigaciones con base en ellos, en los que se ha concluido que son una alternativa atractiva para su uso en amortiguadores de fluido controlable (Carlson, 1994).

Los fluidos MR consisten de micro partículas magnéticamente polarizables dispersas en un medio portador tal como aceite mineral o sintético. Cuando un campo magnético se aplica a estos fluidos, las partículas se ordenan y la suspensión presenta un estado semisólido con comportamiento viscoplástico. La transición de un estado líquido a semisólido se alcanza en milisegundos, permitiendo la construcción de dispositivos de banda ancha. El estado de un fluido MR puede controlarse con bajas entradas de voltaje.

Los AMR son una de las tecnologías más prometedoras de dispositivos disipadores de energía para aplicaciones estructurales. Spencer *et al.*, (1997–1996a), Dyke *et al.*, (1996), y Carlson y Spencer, (1996), desarrollaron estudios para demostrar la eficacia de estos dispositivos en el control de la respuesta sísmica de estructuras. A través de simulaciones y pruebas de laboratorio, mostraron que los AMR logran respuestas comparables con sistemas de amortiguamiento pasivo, mientras requieren sólo una fracción de la energía que necesita un sistema activo. Demostraron que esta tecnología puede ser escalable en dispositivos con tamaño y fuerza adecuada para su instalación en estructuras reales.

De acuerdo con Nishitani e Inoue, (2001), hasta abril de 2000 se ha aplicado el control semiactivo a tres edificios en Japón: edificio No. 21 del Instituto de Investigación de Kajima en Tokio, en 1990; el edificio Kajima Shizuoka en Shizuoka, en 1998; y un edificio de la Universidad de Ciencias e Ingeniería de Keio, en 2000.

Como ejemplos de la utilización de AMR en la protección de estructuras se encuentran el Museo Nacional de Ciencia e Innovación de Japón y el puente del lago Dong Ting en China (Jiménez, 2002).

Algunas de las investigaciones que se han realizado de estructuras controladas con AMR se resumen a continuación.

Spencer y Sain, (1997), describieron el experimento llevado a cabo en el laboratorio de ingeniería sísmica de la Universidad de Notre Dame, de un modelo de un edificio de tres pisos sometido al registro sísmico de El Centro en una versión escalada y controlado con un AMR ubicado en planta baja.

Se obtuvieron reducciones máximas de desplazamiento del tercer piso de 75% y de 48% en aceleración del modelo controlado con AMR respecto al modelo sin control. Además, compararon las respuestas máximas del modelo con AMR con las obtenidas controlando el modelo con un disipador de energía pasivo. Encontraron reducciones respecto a este último de 24 y 29% en desplazamiento y distorsión del tercer piso, respectivamente. De esta manera, demostraron el potencial significativo del uso de los AMR en la protección sísmica de las estructuras.

Symans y Constantinou, (1997), analizaron un modelo a escala de una estructura de acero de tres pisos sometida a excitación sísmica, con control pasivo de alto amortiguamiento, activo y semiactivo. Encontraron que la respuesta de la estructura se reduce significativamente tanto con el control pasivo como con el semiactivo. La respuesta con el control pasivo es menor o casi igual a la obtenida con control semiactivo. Por lo tanto, concluyeron que las ventajas del segundo control no son muy relevantes en comparación con el primero. Sin embargo, aclararon que el control semiactivo es bueno

bajo condiciones especiales como las de suelos donde puede esperarse resonancia de la estructura. En comparación con el control activo, la respuesta fue superada por el control pasivo y el semiactivo.

Johnson *et al.*, (1998), presentaron el estudio del modelo estructural de un edificio de cinco pisos controlado con un sistema aislador de base inteligente usando AMR, para mejorar el desempeño sobre sistemas aisladores de base pasivos.

El estudio demostró el potencial de estos amortiguadores en comparación con dispositivos de control activo. Comparan los tres sistemas de aislamiento de base: pasivo; un dispositivo de control activo; y un AMR.

Encontraron que el AMR, en el sistema aislado, logra reducir las distorsiones de base, 16% más pequeñas que el caso del control activo. Aunque incrementa la aceleración máxima de la azotea sobre el caso de control activo, pero es menor que con el sistema pasivo.

La fuerza máxima aplicada por el AMR es mucho menor que la empleada por el control activo y la energía disipada por este es el doble de la del control activo.

Nishitani e Inoue, (2001), realizaron una comparación entre el control activo y semiactivo. Afirmaron que la aplicación de control activo en las estructuras ha decaído después del sismo de Kobe, debido a que este control no ha mostrado una buena estrategia de mitigación de desastre para sismos severos.

La mayoría de los edificios controlados activamente están encaminados sólo a la reducción de respuesta contra fuertes vientos o sismos moderados. Por el contrario las estrategias de control semiactivo han sido unas de las más prometedoras en esquemas de control estructural contra sismos severos con el principio de menor energía y mejor desempeño.

Ramallo *et al.*, (2002), investigaron el desempeño de un sistema aislador de base inteligente compuesto de cojinetes de neopreno de bajo amortiguamiento y AMR. Se usaron modelos de 2 grados de libertad, gdl, y 6gdl para examinar los efectos de los modos superiores en el desempeño del AMR.

Para los modelos estudiados se encontró que los AMR pueden suministrar una protección superior para un amplio intervalo de sismos tanto moderados como severos, sin disminuir su desempeño, mientras los diseños pasivos tienden a no ser óptimos para eventos diferentes de sus sismos de diseño. Demostraron la versatilidad del AMR ya que usa fuerzas pequeñas para sismos suaves, pero alcanza el límite de saturación para sismos fuertes. Debido a esto, los AMR pueden reducir las distorsiones de entrepiso, mientras simultáneamente reducen aceleraciones y cortante basal.

Choi *et al.*, (2004), propusieron un método de control semiactivo para la reducción de la respuesta sísmica en estructuras con AMR. Emplearon una teoría de control difuso basada en algoritmos de control estructural. Este calcula la señal de comando (voltaje deseado) que varía con el tiempo, dentro del AMR, basado en la respuesta estructural. El objetivo es que el actuador produzca fuerzas tan cercanas como sea posible a las fuerzas deseadas.

Presentaron una estructura de tres pisos controlada, sometida a niveles de excitación normal, alto y bajo. Los resultados de desplazamiento y aceleración mostraron que el desempeño de la estructura con el control semiactivo difuso es reducido significativamente. Esto para los niveles normal y alto del sismo, y respuestas no tanto mejores para el nivel bajo del sismo. Aunque aún sigue siendo efectivo en reducir la respuesta estructural debido a un amplio intervalo de condiciones de carga de sismos.

Jiménez, (2002), estudió el modelo analítico de un edificio de tres pisos sometido al registro sísmico de El Centro escalado en el tiempo con un factor de 5 y controlado con un AMR ubicado entre la base y el primer piso. Obtuvo reducciones en desplazamiento del tercer piso de 73% y en aceleración de 48%, respecto al caso del modelo sin control.

En su estudio propuso un modelo matemático que describe con bastante aproximación el comportamiento del AMR que empleó y que será usado en el presente estudio.

1.2 OBJETIVOS Y ALCANCES

Estudiar el comportamiento estructural del modelo analítico de la estructura de un edificio de cinco pisos, en la que se utilizan dispositivos de control, denominados amortiguadores magneto-reológicos, AMR, para controlar su respuesta sísmica.

Comparar y analizar los resultados del modelo analítico sin control, con el provisto de AMR en estado pasivo y semiactivo, para comprobar la efectividad en la reducción de las respuestas con este controlador.

Proponer una alternativa de diseño sísmico de estructuras con AMR y aplicarla al modelo de un edificio.

CAPÍTULO 2

CONTROL DE LA RESPUESTA SÍSMICA DE ESTRUCTURAS

2.1 CONTROL PASIVO, ACTIVO, HÍBRIDO Y SEMIACTIVO

A lo largo de la historia, ha habido gran preocupación por encontrar maneras de salvaguardar la integridad física de las personas que hacen uso de algún inmueble. Así como para garantizar el mínimo de pérdidas económicas en estructuras sometidas a movimientos sísmicos de mediana y fuerte intensidad mediante el control de desplazamientos y mitigación de daños. En la actualidad, las técnicas que existen para lograr este fin van desde lo más convencional (disipación de energía mediante la formación de articulaciones plásticas en vigas, viga débil-columna fuerte) hasta lo más elaborado, como el control de la respuesta mediante disipadores de energía en todas sus variantes. Los sistemas de control de la respuesta de estructuras se pueden clasificar como pasivo, activo, híbrido y semiactivo.

El control pasivo funciona principalmente a través de la disipación de la energía mediante fricción, fluencia de materiales, deformación de materiales viscoelásticos o mediante el paso de fluidos por orificios. Un ejemplo de control pasivo de uso frecuente en estructuras de acero son los amortiguadores ADAS (*added damping and stiffness*) que funcionan mediante la plastificación de barras paralelas (Soong y Spencer, 2002).

El control activo consta de una masa, cuyo peso corresponde a un cierto porcentaje de la masa de la estructura y es colocada generalmente en la azotea de los edificios. Esta permite contrarrestar el efecto de las fuerzas inerciales de la estructura reduciendo las vibraciones producidas por vientos y/o sismos. Nishitani e Inoue (2001), enumeraron cuatro principios de funcionamiento del control activo: transferir la energía vibratoria de la estructural principal a un sistema oscilatorio auxiliar; reducir el flujo de energía de excitación de entrada en la estructural principal; adicionar a la estructura amortiguamiento adicional; prevenir a la estructura de presentar resonancia tras excitación externa; proveer un sistema estructural con fuerzas controlables por computador.

El control híbrido es una combinación del control pasivo y el activo. El control que provee el sistema activo permite incrementar la eficiencia del sistema pasivo. La energía y las fuerzas que se requieren para controlar el sistema híbrido son mucho menores que si se usara sólo un sistema de control activo.

El control semiactivo es aquel que no interviene en el mecanismo de energía dentro del sistema estructural controlado ya que es considerado como un control pasivo, pero mediante señales adecuadas de control externo, permite reducir las respuestas sísmicas de los edificios. Según Nishitani e Inoue (2001), el principio de funcionamiento del control semiactivo es proveer un sistema estructural con fuerzas controlables por computadora. Así, es posible evitar el movimiento resonante de la estructura seleccionando la rigidez más apropiada. Un dispositivo de control semiactivo no puede inyectar energía en el sistema estructural controlado, aunque tiene la propiedad de poder ser controlado para reducir óptimamente las respuestas del sistema. Por lo tanto, en contraste con dispositivos de control activo, los semiactivos no tienen el potencial para desestabilizar el sistema estructural (Spencer y Sain, 1997).

2.2 DISIPADORES DE ENERGÍA SÍSMICA

Los principales grupos en que se dividen los sistemas de control de la respuesta de estructuras ante cargas laterales son:

Sistemas aisladores de base. Consisten en introducir, entre la estructura y su cimentación, un sistema altamente flexible ante movimientos horizontales y rígido ante movimientos verticales. Se ubican dentro del control pasivo y consisten en cojinetes de neopreno de alto amortiguamiento, cojinetes de neopreno con núcleos de plomo o cojinetes de fricción deslizantes. Poseen gran capacidad de absorción de energía, cambiando así el periodo fundamental de vibración de la estructura a un intervalo de entrada de energía reducido, ya que separan al edificio del movimiento del suelo, por lo que logran protegerlo de acciones sísmicas.

Disipadores de energía pasivos. No requieren fuerzas externas para su funcionamiento. Las fuerzas que imparten al sistema estructural están en función de la respuesta de la estructura a la excitación. Estos sistemas funcionan incrementando la capacidad de disipación de energía de las estructuras.

Disipadores de energía activos. Son dispositivos que contienen fuentes de energía externa y aplican fuerzas a la estructura de una manera específica. Adicionan y disipan energía en la estructura y utilizan información de su respuesta y de la excitación externa.

Disipadores de energía híbridos. Los dispositivos híbridos son una combinación de los disipadores pasivos y activos. El dispositivo pasivo se utiliza para controlar la mayor porción de la respuesta, mientras que el activo optimiza la respuesta y mantiene al sistema pasivo dentro de los parámetros deseados.

Disipadores de energía semiactivos. Son dispositivos considerados como disipadores pasivos cuyas propiedades pueden ser controladas activamente. Un ejemplo es un amortiguador de fluido viscoso cuya constante de amortiguamiento puede ser controlada. Estos sistemas requieren entradas de energía que son significativamente menores a las requeridas por un sistema activo. En ausencia de energía eléctrica, el dispositivo se comportará como un amortiguador pasivo.

Como ejemplos de disipadores de energía semiactivos se pueden mencionar: amortiguadores de fluidos con orificio variable, dispositivos de rigidez variable, dispositivos de fricción controlable, amortiguadores de líquidos calibrados, amortiguadores de impacto controlable y amortiguadores de fluido controlable (Spencer y Sain, 1997).

El presente trabajo se concentra en el estudio de disipadores de energía semiactivos, concretamente en los amortiguadores magneto-reológicos, AMR, que son amortiguadores de tipo fluido controlable. Estos dispositivos son relativamente nuevos en el control de la respuesta estructural. Se muestran atractivos para este fin porque tienen la capacidad de cambiar su resistencia a la fluencia en milisegundos, variándola en cada instante de la acción sísmica o fuerzas de viento, con requerimientos muy bajos de energía, ejerciendo un control continuo de la respuesta estructural.

En el capítulo 6 se presenta el estudio del comportamiento de un modelo estructural de un marco de acero de 5 pisos sometido a excitaciones sísmicas y controlado con AMR. Se verifica la capacidad de estos dispositivos de reducir respuestas de desplazamientos de piso y fuerzas cortantes de entrepiso del modelo.

CAPÍTULO 3

AMORTIGUADORES MAGNETO-REOLÓGICOS, AMR

Para el desarrollo de amortiguadores de fluidos controlables, existen dos tipos de fluidos: electro-reológicos, ER, y magneto-reológicos, MR. Estos fluidos tienen la capacidad de cambiar reversiblemente de viscosos a semisólidos en milisegundos. Tienen una resistencia controlable a la fluencia cuando son expuestos a un campo eléctrico en el caso del ER o un campo magnético en el de los MR (Spencer y Sain, 1997). Es así como tienen la capacidad de soportar esfuerzos de cortante.

La resistencia máxima a la fluencia del fluido MR, es en general, un orden de magnitud mayor que la del mejor fluido ER, mientras su viscosidad es la misma. Esta es una desventaja para el dispositivo ER en relación a su tamaño porque la mínima cantidad de fluido activo en un dispositivo de fluido controlable es proporcional a la viscosidad plástica e inversamente proporcional al cuadrado del campo máximo aplicado de resistencia a la fluencia. Esto significa que al comparar el desempeño mecánico del volumen de fluido MR activo en un dispositivo, éste será alrededor de dos veces más pequeño que el de un fluido ER (Spencer y Sain, 1997). Por esta razón, en la actualidad se están desarrollando investigaciones acerca del desempeño de amortiguadores que trabajan a base de fluido MR, denominados amortiguadores magneto-reológicos, AMR.

La principal aplicación que han tenido los AMR es en el sistema de suspensión de vehículos. En la actualidad, los AMR se están incorporando en la ingeniería civil para la solución de problemas estructurales gracias a estudios en los que se ha encontrado su alta capacidad para disipar energía. El objetivo final es utilizar este tipo de dispositivos para la protección y estabilidad de edificios y cables de puentes propensos a sismos y/o vientos que les generen grandes desplazamientos.

3.1 CARACTERÍSTICAS DE LOS FLUIDOS MAGNETO-REOLÓGICOS, MR

Un fluido MR típico contiene un volumen de 20 a 40% de partículas de hierro magnéticamente activas suspendidas en un fluido portador como aceite mineral, aceite sintético, agua o glicol. El glicol es un compuesto químico que posee grupos alcohólicos sobre átomos de carbono adyacentes (<http://www.rae.es/>).

En términos de mecánica de materiales, los fluidos MR tienen una resistencia a la fluencia que varía entre 50 a 100 kPa (0.5 a 1.0 kg/m² aproximadamente) para un campo magnético aplicado de 150 a 250 kA/m (Spencer y Sain, 1997). El diámetro de las partículas de hierro suspendidas en el fluido portador es del orden de 1 a 10 µm (Srinivasan, 2001), aunque su tamaño depende del diseño del dispositivo y de su aplicación.

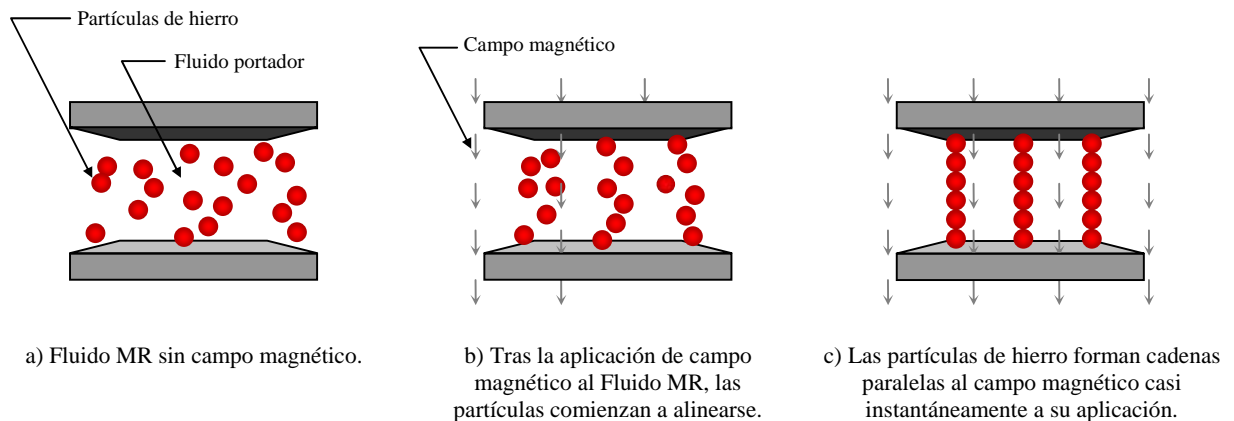
Los fluidos MR tienen alta resistencia a la fluencia, baja viscosidad y un comportamiento de histéresis estable. Presentan como ventajas esfuerzo de fluencia variable y controlable por el usuario; baja potencia requerida para modificar sus propiedades; tolerancia a temperaturas extremas entre -40 a 150°C; y estabilidad de las propiedades del fluido MR ante el campo magnético ante la presencia de contaminantes o impurezas infiltrados durante su fabricación y uso. En la composición de los fluidos MR pueden adicionarse agentes antidesgaste y aditivos lubricantes para aumentar su estabilidad y vida útil (Spencer y Sain, 1997).

En la Tabla 3.1 se resumen las principales propiedades de los fluidos MR (Spencer y Sain, 1997).

Tabla 3.1. Valores característicos de las propiedades de los fluidos MR (Spencer y Sain, 1997).

Propiedad	Valor característico
Resistencia máxima a la fluencia, τ_0	50 a 100 kPa
Campo magnético máximo aplicado	~250 kA/m
Viscosidad plástica, η	0.1 a 1.0 Pa s
Densidad	3 a 4 g/cm ³
Intervalo de suministro de voltaje requerido	2 a 2.5 V, 1 a 2 A

Al aplicar al fluido MR un campo magnético, las partículas de hierro forman cadenas paralelas a este. Estas estructuras producen fricción haciendo que el fluido logre un estado semisólido o con comportamiento plástico (Figuras 3.1 y 3.2). Este cambio reversible de viscosidad del fluido MR ante un campo magnético se logra en milisegundos (menos de 25 ms), y depende de la magnitud del campo magnético aplicado.

**Figura 3.1. Comportamiento de un fluido MR ante un campo magnético.**

Según la relación entre el esfuerzo cortante aplicado a un fluido y la rapidez de deformación resultante, éste puede ser Newtoniano. Fluidos donde el esfuerzo cortante es directamente proporcional a la rapidez de deformación se denominan fluidos Newtonianos, como el agua, el aire, y la gasolina bajo condiciones normales.

Fluidos no Newtonianos son aquellos donde el esfuerzo cortante no es directamente proporcional a la rapidez de deformación, como fluidos con viscosidad alta. En ausencia de un campo magnético externo, el fluido MR puede ser caracterizado como Newtoniano.

La reología es la ciencia que estudia la deformación y el flujo de los materiales, básicamente de fluidos no Newtonianos y describe la interrelación entre fuerza, tiempo y deformación. Dentro de este tipo de fluidos se encuentran las soluciones poliméricas, las suspensiones de partículas y los alimentos, entre otros.

Existen diferentes materiales cuyo comportamiento es distinto cuando son sometidos a un mismo estado de esfuerzo. Por ejemplo, en compresión uniaxial un tipo de material puede sufrir un pequeño acortamiento y luego estabilizarse, mientras que otro puede fluir continuamente.

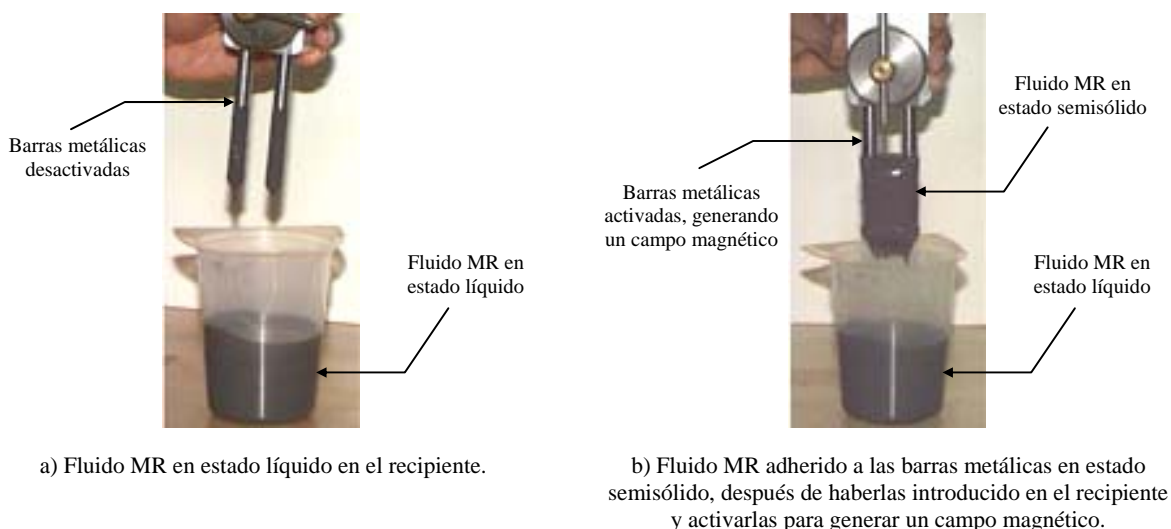
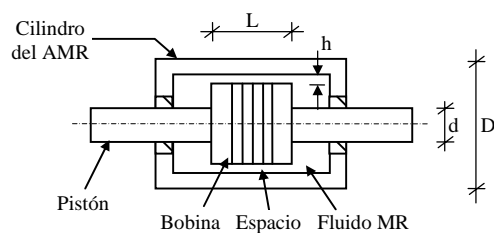


Figura 3.2. Estados del fluido MR sin y con la exposición ante un campo magnético a través de barras metálicas (www.mrfluid.com).

3.2 DESCRIPCIÓN DE LOS AMR

Los AMR usan una geometría particularmente simple en la cual la cubierta cilíndrica externa es parte del circuito magnético. Entre el diámetro exterior del pistón y el interior de la cubierta cilíndrica del amortiguador existe un espacio (Figura 3.3.a), el cual es atravesado por los fluidos debido al movimiento del pistón (Yang, 2001). La fuerza generada depende del movimiento relativo del pistón del amortiguador y el cilindro (Figura 3.3.a), y pueden desarrollarse fuerzas muy grandes con la entrada de solo la suficiente energía de control para producir la resistencia a la fluencia deseada. En la Figura 3.3.b se muestra una de las presentaciones comercial de los AMR.



a) Geometría básica y componentes.



b) Presentación comercial.

Figura 3.3. Amortiguadores magneto-reológicos.

Algunas de las aplicaciones que han tenido los AMR se ilustran en la Figura 3.4.

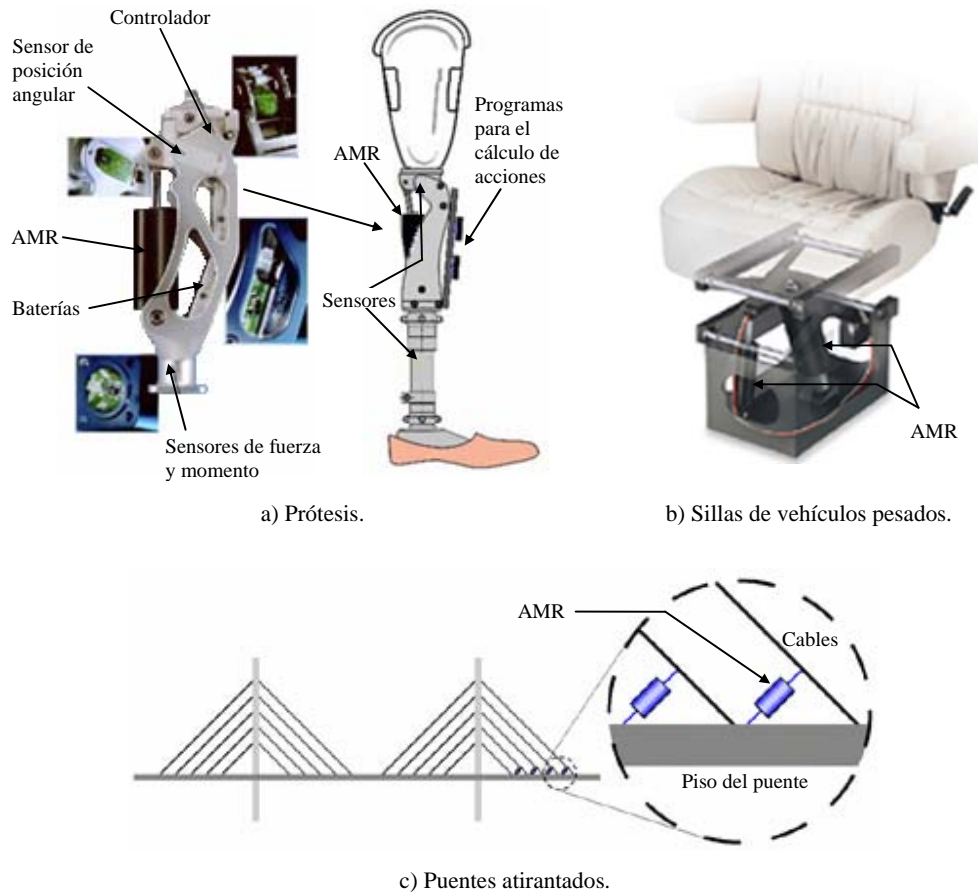


Figura 3.4. Aplicaciones prácticas de los AMR (www.mrfluid.com).

3.2.1 Características de un AMR

Un AMR diseñado y colocado adecuadamente, tiene la capacidad de controlar de una forma precisa e instantánea la respuesta de una estructura sometida a cargas sísmicas y/o de viento.

El AMR ofrece la posibilidad de cambiar sus propiedades en tiempo real, en respuesta a una señal de orden, ofreciendo la posibilidad de ejercer un gran esfuerzo de control con pequeñas entradas de energía. Esto representa una ventaja en comparación con un sistema pasivo, cuyas características son fijas, y con un sistema activo, el cual actúa en su entorno usando energía de otras fuentes (Srinivasan y McFarland, 2001).

La fuerza generada por los AMR, depende del movimiento relativo entre el pistón y el cilindro del amortiguador (Figura 3.3.a). Con la entrada de suficiente voltaje para producir la resistencia al corte deseado en el fluido en el AMR pueden desarrollarse fuerzas muy grandes (Srinivasan y McFarland, 2001).

Una ventaja importante de usar AMR en estructuras que pueden ser sujetas a cargas de viento o movimientos sísmicos es que estos amortiguadores usan bajos requerimientos de voltaje (baterías AA), por lo que es factible operarlos con baterías si el principal suministro eléctrico falla. Además, ofrecen seguridad ante la falla, ya que si la energía para operarlos es completamente interrumpida, se desempeñan como amortiguadores pasivos (Srinivasan y McFarland, 2001).

Los AMR no generan los altos costos en diseño y construcción, ni los altos requerimientos de energía que los amortiguadores activos. Un diseño semiactivo óptimo puede entregar más del desempeño de un diseño activo, con un ahorro tanto de complejidad como de consumo de energía. Poseen simplicidad mecánica, ofrecen incorporación inmediata en la estructura, durabilidad industrial y un periodo de vida útil largo.

Todos los fluidos MR eventualmente mostrarán algún grado de deterioro al final de su vida útil. Este deterioro se manifiesta usualmente como una mayor densidad del fluido, aunque pueden ocurrir otros problemas como en el caso de fluidos basados en aceite sintético. Estos son propensos al corte si están expuestos a altas temperaturas por largos periodos o a radiación por ionización. La cantidad de deterioro depende del índice de fuerza cortante, las condiciones en las cuales el fluido es expuesto y la duración de esta exposición (Carlson, 2001).

Carlson (2001), presenta una ecuación para estimar la vida útil de un fluido MR en una aplicación particular como los AMR, denominada vida de energía disipada, LDE (lifetime dissipated energy), definida como:

$$LDE = \frac{1}{V} \int_0^{\text{vida}} P dt \quad (3.1)$$

donde P es la energía mecánica instantánea convertida en calor en el dispositivo MR; V es el volumen del fluido MR en el AMR; LDE es el total de energía mecánica disipada por unidad de volumen del fluido MR durante la vida de un dispositivo. En la actualidad, el mejor fluido MR puede mantener un LDE del orden de 10^7 J/cm³ antes de que llegue a presentar mayores densidades al punto donde ya no sea útil en un dispositivo de fluido controlable (Carlson, 2001).

3.2.2 Comportamiento de los AMR

Desde el punto de vista de la mecánica de materiales, los AMR son altamente no lineales y su comportamiento presenta ciclos de histéresis. Dependiendo de su uso pasivo o semiactivo, existen dos modelos matemáticos con los que se puede representar su comportamiento.

3.2.2.1 AMR en estado pasivo

Los AMR sin la presencia de campo magnético se comportan como disipadores de energía pasivos. Así es como al incorporar el AMR de forma pasiva en una estructura, pueden generarse reducciones de desplazamientos y fuerzas cortantes de piso.

En la Figura 3.5 se presenta un ciclo experimental carga-desplazamiento del AMR empleado en el presente estudio sin la aplicación de campo magnético. Puede observarse la amplitud del ciclo así como la presencia de plastificación, lo cual demuestra un buen desempeño para disipar energía (Martínez, 2004).

El fluido MR describe un comportamiento histerético no lineal y puede considerarse como un material

no degradante (Figura 3.5). En la actualidad existen modelos matemáticos que logran representar con buena precisión este tipo de comportamiento. Estos modelos presentan una alta cantidad de parámetros que deben ser ajustados a datos experimentales, por lo que presentan un grado de complejidad alto.

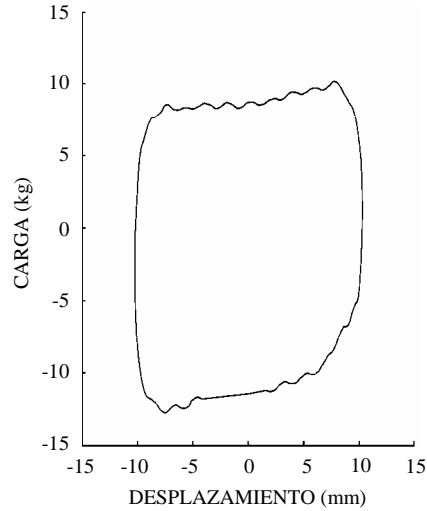


Figura 3.5. Ciclo de histéresis del AMR empleado como disipador de energía pasivo en el presente estudio (Martínez, 2004).

El modelo matemático de Ramberg–Osgood (Escobar *et al.*, 2002) logra representar bien el comportamiento de histéresis de materiales no degradantes, reproduciendo relaciones suavizadas entre carga y desplazamiento al llegar al intervalo de comportamiento no lineal. Esta función consta de dos parámetros que deben ser ajustados, lo que la hace simple y de fácil manejo práctico. Martínez (2004) usó esta función para representar el comportamiento no lineal del AMR en estado pasivo mostrado en la Figura 3.6. El ajuste de los parámetros de dicha función lo realizó a partir del método de mínimos cuadrados lineales. Definiendo:

$$F_o = \frac{F_y}{(\alpha F_y)^{1/n}} \quad (3.2)$$

$$K_y = \frac{F_y}{\delta_y} \quad (3.3)$$

donde K_y es la rigidez elástica del material, F_y y δ_y son la fuerza de fluencia y el desplazamiento de fluencia del material, respectivamente; α y n especifican la forma de la curva carga-desplazamiento y constituyen los parámetros de la función que deben ser ajustados.

El parámetro α se interpreta como el factor que indica la no linealidad de la función, es decir, la rigidez de la curva esquelética. Al aumentar su valor, la curva esquelética correspondiente abandona el comportamiento lineal. Por otro lado, el incremento del valor de n produce relaciones carga-desplazamiento con quiebres cada vez más pronunciados. De esta forma, la curva esquelética evoluciona de ser una relación lineal hasta alcanzar a ser una relación elasto-plástica perfecta. (Martínez, 2004).

La función Ramberg–Osgood es (Ramberg y Osgood, 1943):

$$\delta = \frac{F}{K_y} + \left(\frac{F}{F_o} \right)^n \quad (3.4)$$

donde F y δ son la fuerza y el desplazamiento, respectivamente. En la Tabla 3.2 se muestran los valores de los parámetros del comportamiento de histéresis del AMR pasivo empleado en el presente estudio. Estos parámetros fueron obtenidos por Martínez (2004) para la curva de histéresis (Figura 3.5) del AMR pasivo. En la Figura 3.6 se presenta el resultado del ajuste.

Tabla 3.2. Parámetros de la función Ramberg–Osgood para el ajuste de la curva de histéresis del AMR empleado en este estudio (Martínez, 2004).

Parámetro	Valor
δ_y	0.0606 cm
$\delta_{m\acute{a}x}$	1 cm
F_y	7.21 kg
$F_{m\acute{a}x}$	13 kg
K_y	119 kg/cm
K_u	6.16 kg/cm
n	14.45
α	0.00125

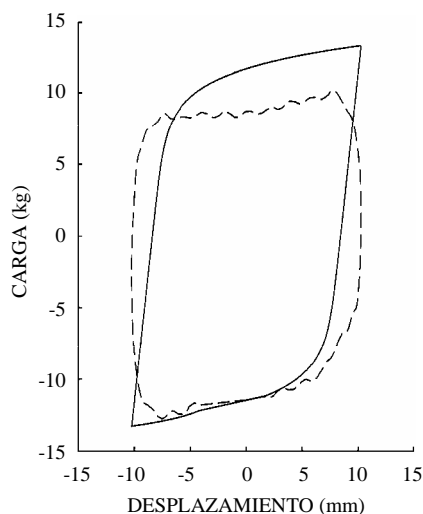


Figura 3.6. Ajuste de la curva de histéresis de la Figura 3.5, del AMR empleado en este estudio. ---- experimental, — ajuste (Martínez, 2004).

En el capítulo 6 se analiza un modelo estructural de 5 pisos controlado con un AMR pasivo, para el cual se utilizaron los parámetros de la función Ramberg–Osgood presentados. Se verifica la reducción de las respuestas mencionadas con el AMR pasivo y se comparan con las respuestas obtenidas del análisis del modelo con AMR semiactivo.

3.2.2.2 AMR en estado semiactivo

Cuando los AMR se someten a fuerzas, su comportamiento varía continuamente en el tiempo dependiendo del voltaje que se les esté enviando.

Para predecir la respuesta dinámica y la disipación de energía del AMR o de un sistema dependiente de este, se han realizado modelos matemáticos que reproducen su comportamiento. Entre los trabajos de investigación más destacados está el de Spencer *et al.*, (1996b), que representa muy bien la respuesta real del amortiguador comparado con otros. La desventaja de este modelo radica en que consta de 14 parámetros que deben ser ajustados a datos experimentales y del modelo no lineal de Bouc-Wen (Figura 3.7). Dicha estructura consiste en un modelo que puede representar una amplia variedad de comportamientos de histéresis de relaciones esfuerzo-deformación y es ampliamente usado por su simplicidad matemática (Sain *et al.*, 1997).

A pesar de que el modelo de Spencer *et al.*, (1996) muestra un desempeño confiable, se trata de un modelo con una complejidad matemática alta. Por lo tanto, su uso en el diseño de esquemas de control y su aplicación en la práctica es limitado (Jiménez, 2002).

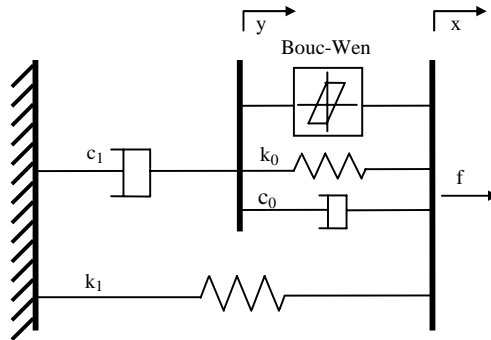


Figura 3.7. Representación mecánica del AMR basada en el modelo de Bouc-Wen (Srinivasan y McFarland, 2001).

En la Figura 3.7, *f* representa la fuerza aplicada al AMR; *x*, *y* son el desplazamiento del AMR y de la estructura, respectivamente; *c*₀ es el amortiguamiento viscoso dominante en velocidades altas; *c*₁ permite al modelo seguir el comportamiento pasivo observado experimentalmente en velocidades bajas; *k*₀ controla la rigidez del modelo en velocidades altas; la combinación de *k*₁ y el desplazamiento inicial *x*₀ se asocia con la fuerza nominal del acumulador (Srinivasan y McFarland, 2001).

Jiménez (2002) propuso un modelo matemático basado en el modelo de Canudas *et al.*, (1995) para disipadores de energía pasivos de fricción. Sus principales características son su sencillez analítica y su capacidad de reproducir el comportamiento dinámico del amortiguador con buena exactitud (Jiménez, 2002). En este estudio se usará este modelo para representar el comportamiento del AMR empleado en estado semiactivo.

El modelo matemático propuesto por Jiménez (2002) para describir el comportamiento del AMR al aplicarle un campo magnético que varía en el tiempo está compuesto de:

$$F = \sigma_0 z \text{ vol} + \sigma_1 \dot{z} + \sigma_2 \dot{x} \tag{3.5}$$

$$\dot{z} = \dot{x} - \sigma_0 |\dot{x}| (a_0 + a_1 \text{ vol}) z \tag{3.6}$$

donde F es la fuerza ejercida por el AMR; \dot{x} es la velocidad relativa entre los extremos del amortiguador; z es una variable que no tiene un significado físico pero puede interpretarse como el comportamiento de deformación del fluido MR, en consecuencia \dot{z} es la velocidad de deformación de este fluido; vol es el voltaje aplicado; y σ_0 , σ_1 , σ_2 , a_0 y a_1 son parámetros constantes del AMR. Estos parámetros no tienen representación física, sus valores son diferentes para cada tamaño o características de los AMR y se ajustan de una manera empírica respecto a datos experimentales para que la respuesta analítica sea congruente con estos últimos. Además, aunque estos parámetros tienen unidades, estas no son congruentes, es necesario que las tengan para que al ser multiplicados por otras variables puedan resultar las unidades requeridas (Jiménez, 2005). En el caso de la ec. (3.5) deben resultar unidades de fuerza y en la (3.6) de velocidad.

Según Jiménez (2005), σ_0 es la rigidez del fluido MR relacionada con el voltaje aplicado; σ_1 es el amortiguamiento debido la velocidad de deformación del fluido; σ_2 es el amortiguamiento debido a la velocidad de desplazamiento de los extremos del amortiguador; el término $(a_0 + a_0 a_1 vol)$ sirve para modelar la influencia que tiene el voltaje aplicado al amortiguador, sobre la velocidad de deformación del fluido.

En la Tabla 3.3 se muestran los valores de estos parámetros ajustados por Jiménez (2002) para el AMR que será utilizado en este estudio.

Tabla 3.3. Parámetros para el modelo del AMR empleado en este estudio (Jiménez, 2002).

Parámetro	Valor
σ_0	1059300 kg/(V s ²)
σ_1	5800 kg/s
σ_2	2300 kg/s
a_0	0.003 (s ² V)/(kg m)
a_1	-0.1444 V ⁻¹

Debido a que el cambio del fluido MR de un estado líquido a uno semisólido ante un campo magnético se logra en milisegundos, es válido suponer que $\dot{z}=0$, es decir, que es un cambio instantáneo. Con esta suposición, de la ec. (3.6):

$$z = \frac{\dot{x}}{\sigma_0 |\dot{x}| (a_0 + a_0 a_1 vol)} \quad (3.7)$$

Con la función sign, para cada elemento de x , $\text{sign}(x)$, devuelve 1 si el elemento es mayor que cero, 0 si es igual a cero y -1 si es menor que cero, $|\dot{x}|$ puede escribirse como:

$$|\dot{x}| = \frac{\dot{x}}{\text{sign}(\dot{x})} \quad (3.8)$$

La ec. (3.8) también puede escribirse como:

$$|\dot{x}| = \dot{x} \text{sign}(\dot{x}) \quad (3.9)$$

Al sustituir la ec. (3.9) en la (3.7), y simplificar:

$$z = \frac{1}{\sigma_0 \text{sign}(\dot{x})(a_0 + a_0 a_1 \text{vol})} \quad (3.10)$$

Si $\dot{z} = 0$, de la ec. (3.5) se obtiene:

$$\text{vol} = \frac{F - \sigma_2 \dot{x}}{\sigma_0 z} \quad (3.11)$$

Al sustituir la ec. (3.10) en la (3.11), se obtiene:

$$\text{vol} = \frac{a_0 (F - \sigma_2 \dot{x})}{\text{sign}(\dot{x}) - a_0 a_1 (F - \sigma_2 \dot{x})} \quad (3.12)$$

Las ecs. (3.10) y (3.12) se reemplazan en la (3.5) y se obtiene la fuerza de control que generará el AMR en cada instante. Esto es:

$$F_{\text{AMR}} = \sigma_0 \left(\frac{1}{\sigma_0 \text{sign}(\dot{x})(a_0 + a_0 a_1 \text{vol})} \right) \left(\frac{a_0 (F - \sigma_2 \dot{x})}{\text{sign}(\dot{x}) - a_0 a_1 (F - \sigma_2 \dot{x})} \right) + \sigma_2 \dot{x} \quad (3.13)$$

donde F es la fuerza que se desea generar con el AMR y con la que se obtendrá el voltaje de la ec. (3.12). El AMR no puede reproducir a F con exactitud. Por lo tanto, la fuerza que realmente generará el amortiguador será F_{AMR} .

3.2.3 Diseño de los AMR

En los dispositivos donde se emplean los fluidos MR, en cada instante sólo una pequeña porción del fluido es sujeta al campo magnético aplicado. Mientras el resto es libre de fluir como un fluido convencional de baja viscosidad.

El campo magnético es transmitido al fluido MR a través de las paredes del amortiguador, que a la vez sirven como los límites del espacio donde está contenido, o a través del émbolo. Para propósitos de análisis, las paredes son frecuentemente modeladas como placas planas paralelas. Las ecuaciones resultantes son frecuentemente aplicadas para otras geometrías no planas de modelos más realistas con resultados aceptables, como por ejemplo amortiguadores cilíndricos (Spencer *et al.*, 1998).

Los amortiguadores pueden ser construidos como placa fija o placa deslizante (Figura 3.8). En amortiguadores donde el pistón y el cilindro forman las paredes del espacio, el pistón hace el papel de placa deslizante (Figura 3.8.b). La adaptación de placa fija tiene la ventaja de que el volumen del amortiguador es constante, mientras en la de placa deslizante, usualmente se incorpora un acumulador para permitir el desplazamiento del fluido por la barra del pistón (Srinivasan y McFarland, 2001).

Las dos adaptaciones anteriores tienen un espacio formado por placas paralelas, el cual es pequeño en la dirección del campo magnético. En ambas debe tenerse en cuenta la forma en la que el cortante se crea en el fluido, el cual puede ser producido forzando el flujo a través del espacio bajo presión (Figura 3.8.a) o por el movimiento de una placa con respecto a la otra (Figura 3.8.b). Este espacio es requerido para producir un campo suficientemente fuerte para activar el fluido. Los efectos del fluido MR, esto es, la formación de cadenas en la dirección del campo magnético aplicado, ocurrirá en un espacio mayor si se genera un campo magnético adecuado (Srinivasan y McFarland, 2001).

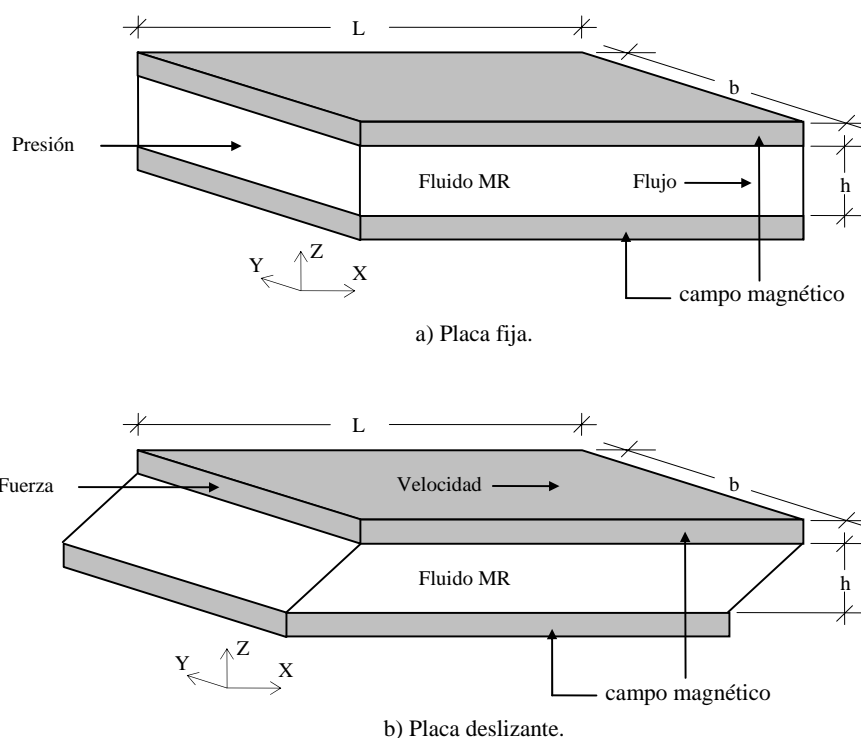


Figura 3.8. Geometría y modos de corte del fluido MR (Srinivasan y McFarland, 2001).

En la Figura 3.9 se representa lo que ocurre en el fluido MR cuando la presión que se le impone excede el nivel crítico. Se presenta un flujo caracterizado por el corte de una capa cerca de cada placa, mientras la parte central del fluido permanece sin fluir (Srinivasan y McFarland, 2001).

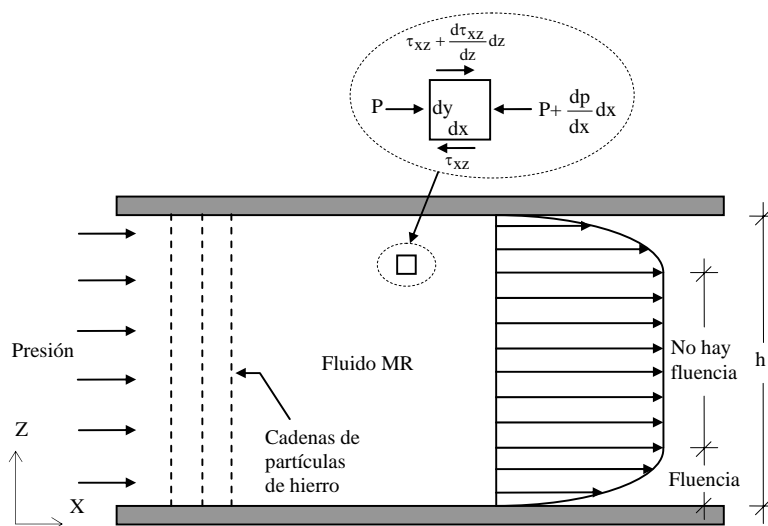


Figura 3.9. Distribución de la velocidad de flujo del fluido MR fluyendo a través de dos placas paralelas con campo magnético (Srinivasan y McFarland, 2001).

Existen organizaciones que desarrollan aplicaciones comerciales con tecnología basada en materiales reológicos (LORD Corporation, www.mrfluid.com). Esta tecnología permite a los sistemas responder de forma instantánea y controlable para variar sus niveles de vibración, choque o movimiento.

Existen prototipos diseñados para aplicaciones de control estructural (Figuras 3.10 y 3.11). Tienen una capacidad nominal de 180 kN (Figura 3.10) que opera con una potencia máxima de 84 W, 42 V y con una corriente máxima de 2 A. Es un amortiguador con un diámetro interno de 8.89 cm, longitud de 54.6 cm (Figura 3.11.a) y sección transversal de 24.1 x 24.1 cm (Figura 3.11.b). Las dimensiones y la fuerza que es capaz de generar este amortiguador lo hacen candidato para el control de la respuesta de desplazamientos y fuerzas cortantes de piso de edificios sometidos a cargas de sismos severos y/o vientos intensos.



Figura 3.10. AMR para control de estructuras (www.mrfluid.com).

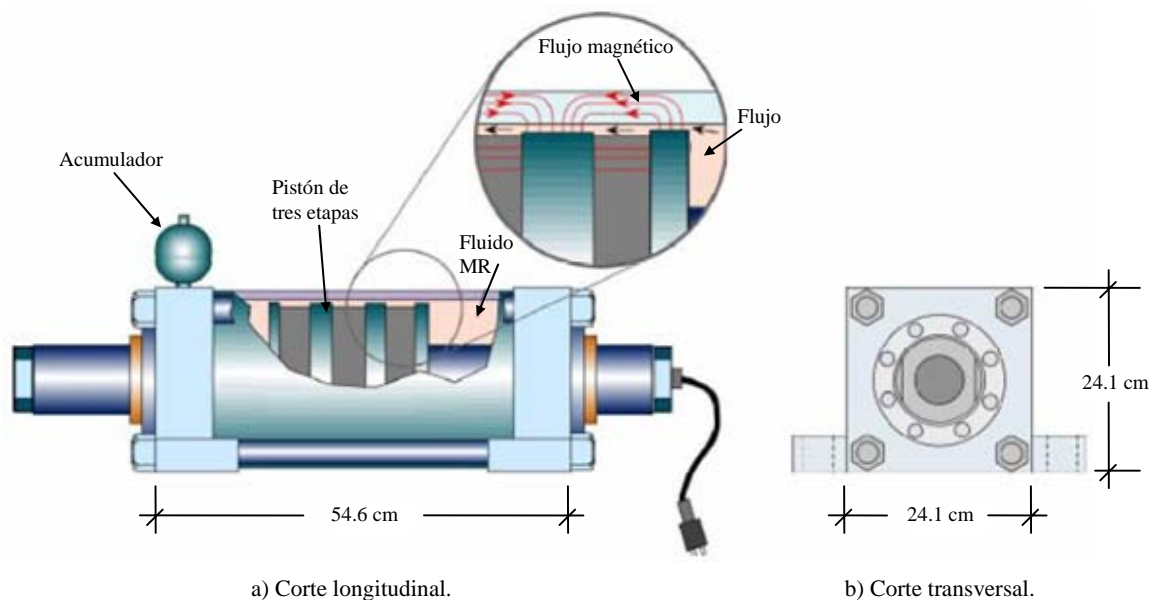


Figura 3.11. Esquema del AMR para control de estructuras (www.mrfluid.com).

Otros prototipos comerciales de AMR tienen capacidad de 60 y 120 kN, y son más pequeños. El prototipo que será usado en este estudio (Figura 6.4) tiene una capacidad de 2000 N y se describe en la sección 6.2.2. A continuación, se describe un criterio de diseño de la geometría de un AMR (Yang G, 2001). Para ello, se supone que los siguientes parámetros deben ser conocidos:

- Esfuerzo a la fluencia del fluido MR, τ_0 , (Tabla 3.1) y parámetros del fluido que deben tener valores mayores que cero.
- Tamaño.
- Velocidad admisible máxima del pistón.

El diseño de la geometría consiste en elegir una dimensión h y longitud del polo activo, L , apropiados (Figuras 3.8 y 3.9), tal que los requerimientos del intervalo dinámico, D , y fuerza controlable F_τ , sean alcanzados. Los parámetros F_τ y D , son dos de los más importantes para evaluar el comportamiento del AMR. El intervalo dinámico se define como la relación entre la fuerza resistente del AMR, F , y la fuerza no controlable, F_{uc} , esto es:

$$D = \frac{F}{F_{uc}} = \frac{F_\tau + F_\eta + F_f}{F_\eta + F_f} \quad (3.14)$$

donde F incluye una fuerza controlable, F_τ , debido a τ_0 ; una fuerza de viscosidad plástica, F_η ; y una fuerza de fricción, F_f . El parámetro F_{uc} incluye una fuerza de viscosidad plástica, F_η ; y una fuerza de fricción, F_f .

En la práctica no es posible conocer el valor exacto de F_f antes de que el amortiguador sea construido y probado. Por lo tanto, puede aceptarse razonablemente que $F_\eta = F_f$. Debido a que $F_\tau + F_\eta \gg F_f$, la ec. (3.14) puede escribirse como:

$$D = \frac{F_\tau + F_\eta}{2F_\eta} \quad (3.15)$$

Debido a que (Yang G, 2001):

$$F_\tau + F_\eta = \left(\frac{dp}{dx} \right)_{\tau_0} A_p L \quad (3.16)$$

$$F_\eta = \left(\frac{dp}{dx} \right)_{\tau_0=0} A_p L \quad (3.17)$$

donde A_p es el área de la sección transversal del pistón, $\left(\frac{dp}{dx} \right)_{\tau_0}$ es el gradiente de presión sin el esfuerzo de fluencia del fluido. Con las ecs. (3.16) y (3.17), la (3.15) puede escribirse como:

$$\frac{\left(\frac{dp}{dx} \right)_{\tau_0}}{\left(\frac{dp}{dx} \right)_{\tau_0=0}} = 2D \quad (3.18)$$

El tamaño de h se determina tal que (Yang G, 2001):

$$\frac{\left(\frac{dp}{dx}\right)_{\tau_0}}{\left(\frac{dp}{dx}\right)_{\tau_0=0}} \geq 2D \quad (3.19)$$

El tamaño de h deber elegirse para que no cause dificultades de manufactura. El parámetro L puede calcularse como (Yang G, 2001):

$$L = \frac{F_{\tau}}{A_p \left[\left(\frac{dp}{dx}\right)_{\tau_0} - \left(\frac{dp}{dx}\right)_{\tau_0=0} \right]} \quad (3.20)$$

La fuerza resistente del amortiguador, F, se puede estimar como:

$$F = \left(\frac{dp}{dx}\right)_{\tau_0} A_p L + F_f = \left[\left(\frac{dp}{dx}\right)_{\tau_0} - \left(\frac{dp}{dx}\right)_{\tau_0=0} \right] A_p L \quad (3.21)$$

Cabe señalar que el diseño de un AMR corresponde a la ingeniería mecánica y a expertos en reología, ya que primero debe realizarse el diseño del fluido magneto-reológico, el diseño de la geometría del amortiguador que va a portarlo y el diseño del circuito magnético. Profundizar en este tema queda fuera del alcance de los objetivos del presente trabajo.

CAPÍTULO 4 CONTROL ACTIVO DE ESTRUCTURAS

El control de la respuesta estructural se basa en el logro de objetivos propuestos mediante la ejecución de ciertas estrategias con las que se obtienen los resultados esperados. Esta premisa sobre este tipo de control ha tenido un papel vital en el avance de la ingeniería y la ciencia. En la vida cotidiana se presentan problemas de control a cada instante, por ejemplo, regular la temperatura y humedad de las casas y edificios para vivir confortablemente. En una carrera de maratón no sólo se debe correr una distancia tan rápido como sea posible, sino que al hacer esto, se debe idear la mejor estrategia para controlar el consumo de energía (Ogata, 1997).

En la Figura 4.1 se muestra un esquema de control simple. Existen unas entradas y por medio de sistemas de control se obtienen unas salidas que corresponden a las respuestas deseadas.

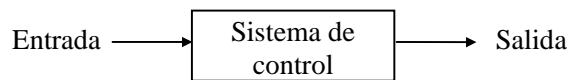


Figura 4.1. Componentes básicos de un sistema de control.

Retomando el caso de regular la temperatura de una casa, una persona puede manipular un calefactor de forma manual tantas veces como se requiera hasta alcanzar y mantener constante la temperatura deseada. Existen calefactores que regulan la temperatura de manera automática, pero para hacerlo necesitan un dato de entrada que es la temperatura que la persona desea. Este calefactor tiene un sistema de control interno que mide la temperatura existente en un instante, si no es la deseada, este se activa y va tomando temperaturas comparándolas con la de referencia hasta lograrla y mantenerla fija. Esto es un ejemplo de control activo.

4.1 INTRODUCCIÓN AL CONTROL ACTIVO

En el control activo intervienen dos variables fundamentales:

- **variable controlada:** es la cantidad o condición que es medida u observada, y controlada.
- **variable manipulada:** es la cantidad o condición que es variada por un controlador, para afectar el valor de la variable controlada.

Control activo significa medir el valor de la variable controlada y aplicar la variable manipulada realizando un proceso de retroalimentación para obtener valores deseados (Ogata, 1997).

Los desplazamientos laterales de piso de una estructura cuando está sometida a fuerzas horizontales externas son un ejemplo de variable controlada. Los desplazamientos están relacionados con las distorsiones de entrepiso. Estas distorsiones son una medida representativa del daño estructural, por tal motivo, en los reglamentos de diseño se recomiendan límites permisibles de acuerdo con el sistema estructural. De tal forma que en un diseño convencional la rigidez de la estructura se modifica de manera iterativa para cumplir con la distorsión permisible correspondiente.

Otra forma de controlar las distorsiones de entrepiso puede ser incorporando en la estructura un disipador de energía activo, que es la variable manipulada. Este dispositivo recibirá órdenes de una

computadora sobre cómo debe comportarse en cada instante de tiempo para lograr reducir los desplazamientos de piso de la estructura.

En la Figura 4.2 se muestra el esquema de una estructura con control activo excitada por una fuerza externa, la cual puede ser un registro sísmico de aceleraciones en su base. Para cada instante de la acción sísmica, existirá una respuesta de la estructura. Habrá dos grupos de sensores que midan y envíen a una computadora la información de la acción sísmica y de la respuesta estructural en cada instante de tiempo. La computadora procesará la información medida y calculará las fuerzas de control necesarias basadas en un algoritmo de control. Los dispositivos de control producirán estas fuerzas a través de fuentes de energía externas.

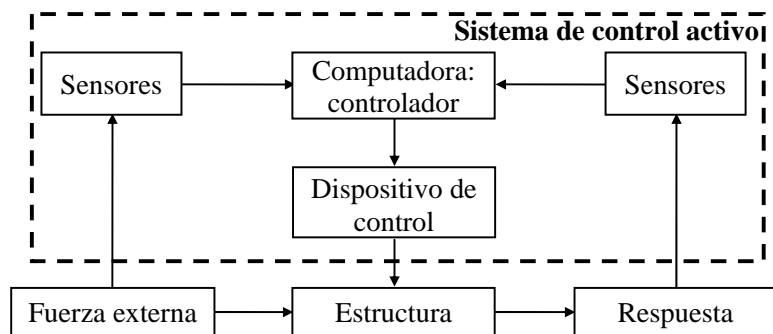


Figura 4.2. Esquema de control activo.

Al presentarse una fuerza externa en la estructura, es detectada por sensores, al igual que la respuesta de esta. Estos sensores están conectados al controlador, el cual está conformado por una computadora y un programa que compara las respuestas medidas con las esperadas. En el momento en que el controlador detecte que una respuesta ha superado un umbral previamente establecido, automáticamente enviará órdenes de control a los dispositivos en cada instante para lograr reducir la respuesta.

En la Figura 4.3 se muestra un esquema de control semiactivo. Los dispositivos disipadores de energía en este caso son AMR, los cuales recibirán una parte o toda la fuerza cortante basal generada por la acción de la fuerza externa en la estructura. En este caso, la orden que el controlador envíe en cada instante a los AMR, son voltajes que cambiarán en milisegundos la resistencia a la fluencia de estos, justa para disipar ese cortante basal, logrando reducir la respuesta de la estructura.

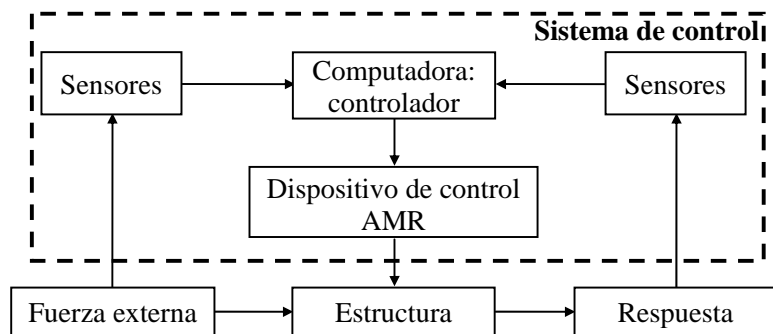


Figura 4.3. Esquema de una estructura con un AMR, dispositivo de control semiactivo.

4.2 APLICACIÓN DEL CONTROL ACTIVO A ESTRUCTURAS

En el control activo de una estructura interviene su masa, rigidez, y amortiguamiento. Como ejemplo del control activo en edificios, se presenta una estructura de cortante de dos grados de libertad, 2gdl, masas m_1 y m_2 , soportadas por dos resortes con rigidez elástica k_1 y k_2 , donde 1 y 2 son los grados de libertad en dirección X, para el piso uno y dos, respectivamente. La estructura estará sometida a un registro sísmico que produce una aceleración \ddot{x}_g (Figura 4.4).

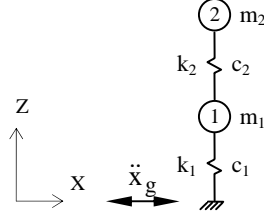


Figura 4.4. Estructura de cortante de 2gdl sometida a un registro sísmico.

La ecuación de equilibrio dinámico de este sistema al ser sometido a una acción sísmica en la base, es:

$$[M]\{\ddot{x}\} + [C]\{\dot{x}\} + [K]\{x\} = -[M]\{j\}\ddot{x}_g \quad (4.1)$$

donde $[M]$, $[C]$ y $[K]$ son las matrices de masas, rigidez y amortiguamiento del sistema, de orden 2×2 ; $\{j\}$ es un vector unitario de 2×1 ; $\{x\}$, $\{\dot{x}\}$ y $\{\ddot{x}\}$ son vectores de orden 2×1 que corresponden a los desplazamientos, velocidades y aceleraciones, respectivamente, de cada piso en cada instante del registro sísmico, \ddot{x}_g , el cual corresponde a un escalar para cada instante de tiempo y contiene un total de s puntos. Así, para el sistema de la Figura 4.4, se tiene:

$$[M] = \begin{bmatrix} m_1 & 0 \\ 0 & m_2 \end{bmatrix} \quad (4.2)$$

$$[K] = \begin{bmatrix} k_1 + k_2 & -k_2 \\ -k_2 & k_2 \end{bmatrix} \quad (4.3)$$

$$[C] = \begin{bmatrix} c_1 + c_2 & -c_2 \\ -c_2 & c_2 \end{bmatrix} \quad (4.4)$$

$$\{j\} = \begin{Bmatrix} 1 \\ 1 \end{Bmatrix} \quad (4.5)$$

Al multiplicar la ec. (4.1) por $[M]^{-1}$ se tiene que:

$$\{\ddot{x}\} = -[M]^{-1}[K]\{x\} - [M]^{-1}[C]\{\dot{x}\} - \{j\}\ddot{x}_g \quad (4.6)$$

Sustituyendo las ecs. (4.2) a (4.5) en la (4.6):

$$\begin{aligned}
 \begin{Bmatrix} \ddot{x}_1 \\ \ddot{x}_2 \end{Bmatrix} &= - \begin{bmatrix} m_1 & 0 \\ 0 & m_2 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} k_1 + k_2 & -k_2 \\ -k_2 & k_2 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{Bmatrix} - \begin{bmatrix} m_1 & 0 \\ 0 & m_2 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} c_1 + c_2 & -c_2 \\ -c_2 & c_2 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \end{Bmatrix} - \begin{Bmatrix} 1 \\ 1 \end{Bmatrix} \ddot{x}_g = \\
 &= \begin{bmatrix} -\frac{(k_1 + k_2)}{m_1} & \frac{k_2}{m_1} \\ \frac{k_2}{m_2} & -\frac{k_2}{m_2} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} -\frac{(c_1 + c_2)}{m_1} & \frac{c_2}{m_1} \\ \frac{c_2}{m_2} & -\frac{c_2}{m_2} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \end{Bmatrix} - \begin{Bmatrix} 1 \\ 1 \end{Bmatrix} \ddot{x}_g = \\
 &= \begin{bmatrix} -\frac{(k_1 + k_2)}{m_1} & \frac{k_2}{m_1} & -\frac{(c_1 + c_2)}{m_1} & \frac{c_2}{m_1} \\ \frac{k_2}{m_2} & -\frac{k_2}{m_2} & \frac{c_2}{m_2} & -\frac{c_2}{m_2} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \end{Bmatrix} - \begin{Bmatrix} 1 \\ 1 \end{Bmatrix} \ddot{x}_g \quad (4.7)
 \end{aligned}$$

En la ecuación anterior, la matriz en control activo debe ser cuadrada, con valores reales. Para hacer esto sin alterar el sistema de ecuaciones se hace lo siguiente:

$$\begin{Bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \\ \ddot{x}_1 \\ \ddot{x}_2 \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ -\frac{(k_1 + k_2)}{m_1} & \frac{k_2}{m_1} & -\frac{(c_1 + c_2)}{m_1} & \frac{c_2}{m_1} \\ \frac{k_2}{m_2} & -\frac{k_2}{m_2} & \frac{c_2}{m_2} & -\frac{c_2}{m_2} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \end{Bmatrix} + \begin{Bmatrix} 0 \\ 0 \\ -1 \\ -1 \end{Bmatrix} \ddot{x}_g \quad (4.8)$$

Compactando la ec. (4.8), se tiene:

$$\{\dot{p}\} = [A]\{p\} + \{B\}u \quad (4.9)$$

donde $\{\dot{p}\}$ es un vector de orden 4x1 que contiene las velocidades y aceleraciones del sistema para cada instante del registro sísmico; $[A]$ es una matriz que contiene las propiedades del sistema de dos grados de libertad, de orden 4x4; $\{p\}$ es un vector que representa los desplazamientos y velocidades de los pisos de la estructura para cada instante del registro sísmico, de orden 4x1; $\{B\}$ es un vector de orden 4x1 que establece la ubicación de las fuerzas de control en los pisos de la estructura donde están aplicadas; u es la fuerza de control y corresponde a un escalar para cada instante de tiempo.

Ya que en este ejemplo no existe disipador de energía en la estructura, la fuerza u pasa de ser una fuerza de control a una fuerza de perturbación, que corresponde a la acción sísmica \ddot{x}_g que está excitando su respuesta. El vector $\{B\}$ indica que u está aplicada en ambos pisos del sistema de 2gdl.

Para seleccionar las respuestas específicas que se quieren conocer, a partir del vector $\{p\}$, es necesario multiplicarlo con una matriz $[R]$, de lo cual resulta un vector $\{q\}$. Este vector contiene las respuestas elegidas de la estructura para cada instante del registro sísmico. No siempre la matriz $[R]$ tendrá el mismo orden. Para el sistema de 2gdl, si se desea conocer todas las respuestas, $[R]$ será una matriz identidad de orden 4x4. Si sólo se quiere conocer los desplazamientos de los dos pisos se tiene:

$$\begin{Bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \end{Bmatrix} \quad (4.10)$$

Llamando $\{q\} = \begin{Bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{Bmatrix}$ y $[R] = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix}$, la ec. (4.10) se puede compactar como:

$$\{q\} = [R]\{p\} \quad (4.11)$$

donde $\{q\}$ es de orden 2×1 ; y $[R]$ de orden 2×4 , ambos para el sistema de 2gdl. Con las ecs. (4.9) y (4.11) se calculan los desplazamientos y velocidades del sistema de 2gdl sometido a acción sísmica.

Para un sistema de n gdl sin control, en la ec. (4.1) las matrices $[M]$, $[C]$ y $[K]$ serán de orden $n \times n$; $\{j\}$ de $n \times 1$; $\{\ddot{x}\}$, $\{\dot{x}\}$ y $\{x\}$ de orden $s \times 1$; \ddot{x}_g es un escalar. Entonces, la ec. (4.8) será:

$$\begin{Bmatrix} \{\dot{x}\}_{n \times 1} \\ \{\ddot{x}\}_{n \times 1} \end{Bmatrix}_{2n \times 1} = \begin{bmatrix} [0]_{n \times n} & [I]_{n \times n} \\ -[M^{-1}K]_{n \times n} & -[M^{-1}C]_{n \times n} \end{bmatrix}_{2n \times 2n} \begin{Bmatrix} \{x\}_{n \times 1} \\ \{\dot{x}\}_{n \times 1} \end{Bmatrix}_{2n \times 1} + \begin{Bmatrix} \{0\}_{n \times 1} \\ \{-1\}_{n \times 1} \end{Bmatrix}_{2n \times 1} \ddot{x}_g \quad (4.12)$$

y de la ec. (4.9) se tendrá que:

$$\{p\} = \begin{Bmatrix} \{x\}_{n \times 1} \\ \{\dot{x}\}_{n \times 1} \end{Bmatrix}_{2n \times 1} \quad (4.13)$$

$$[A] = \begin{bmatrix} [0]_{n \times n} & [I]_{n \times n} \\ -[M^{-1}K]_{n \times n} & -[M^{-1}C]_{n \times n} \end{bmatrix}_{2n \times 2n} \quad (4.14)$$

$$\{p\} = \begin{Bmatrix} \{x\}_{n \times 1} \\ \{\dot{x}\}_{n \times 1} \end{Bmatrix}_{2n \times 1} \quad (4.15)$$

$$\{B\} = \begin{Bmatrix} \{0\}_{n \times 1} \\ \{-1\}_{n \times 1} \end{Bmatrix}_{2n \times 1} \quad (4.16)$$

$$u = \ddot{x}_g$$

La respuesta del sistema estará dada por la ec. (4.11), que ahora será:

$$\{q\}_{(1a\ 2n) \times 1} = [R]_{(1a\ 2n) \times 2n} \left\{ \begin{array}{l} \{x\}_{nx1} \\ \{\dot{x}\}_{nx1} \end{array} \right\}_{2nx1} \quad (4.17)$$

El proceso para calcular los desplazamientos y velocidades de los pisos de una estructura de n gdl, puede representarse mediante el diagrama de bloques de la Figura 4.5. Para cada valor de \ddot{x}_g , se generan vectores $\{q\}$ y vectores de fuerza cortante de entrepiso, $\{FV\}$, para cada instante del registro sísmico, calculadas con la rigidez lateral de cada entrepiso que se encuentran en el vector $\{k\}$. En esta figura E es módulo de elasticidad; I_y es momento de inercia en dirección Y; y L es longitud. Estos tres últimos parámetros corresponden a las columnas de la estructura.

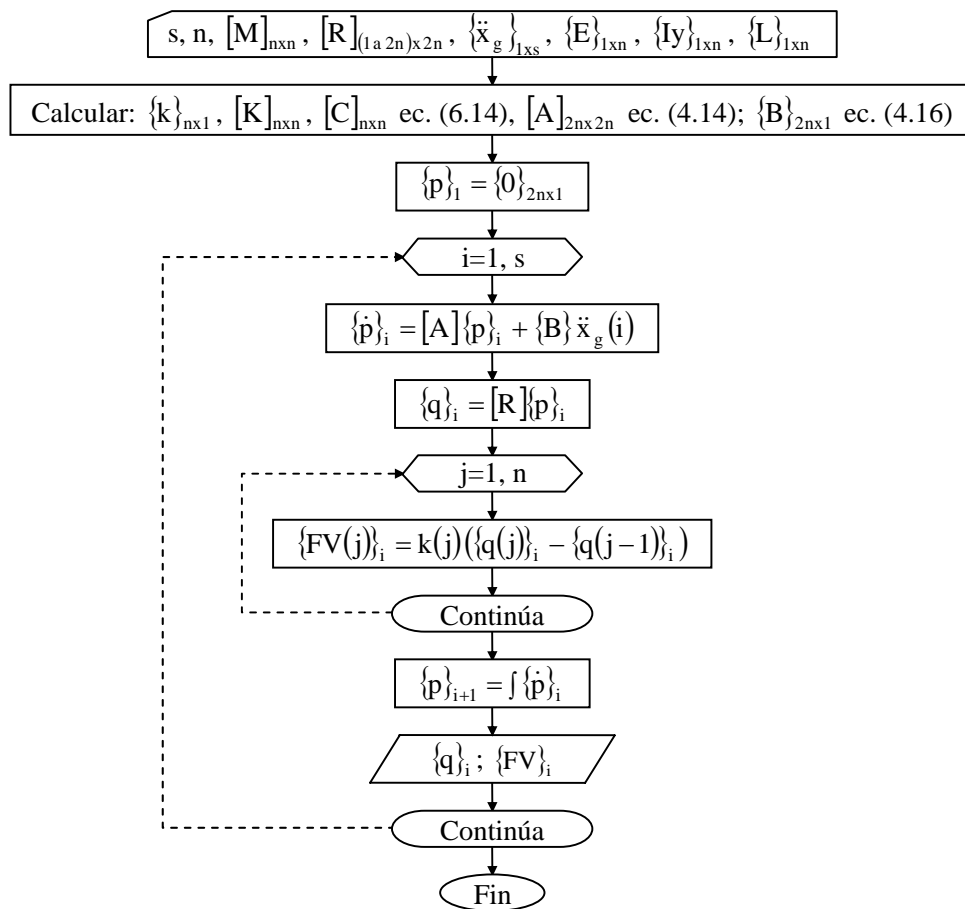


Figura 4.5. Cálculo de la historia de la respuesta de una estructura convencional.

Si al sistema de 2gdl de la Figura 4.4 se le aplica una fuerza de control, F, que corresponde a un escalon para cada instante de tiempo, producida por un disipador de energía para controlar su respuesta, la ecuación de equilibrio dinámico es:

$$[M]\{\ddot{x}\} + [C]\{\dot{x}\} + [K]\{x\} = -[M]\{j\}\ddot{x}_g + \{d\}F \quad (4.18)$$

donde $\{d\}$ es un vector de orden 2×1 , que establece la ubicación de la fuerza de control en los pisos de la estructura donde está aplicada. En el sistema de 2gdl, F está aplicada en el primer piso, así $\{d\}$ es:

$$\{d\} = \begin{Bmatrix} 1 \\ 0 \end{Bmatrix} \quad (4.19)$$

Al multiplicar la ec. (4.18) por $[M]^{-1}$ y despejar $\{\ddot{x}\}$, se obtiene que:

$$\{\ddot{x}\} = -[M]^{-1}[K]\{x\} - [M]^{-1}[C]\{\dot{x}\} - \{j\}\ddot{x}_g + [M]^{-1}\{d\}F \quad (4.20)$$

Al reemplazar las ecs. (4.2) a (4.5) y (4.19) en la (4.20), se obtiene:

$$\begin{Bmatrix} \ddot{x}_1 \\ \ddot{x}_2 \end{Bmatrix} = - \begin{bmatrix} m_1 & 0 \\ 0 & m_2 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} k_1 + k_2 & -k_2 \\ -k_2 & k_2 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{Bmatrix} - \begin{bmatrix} m_1 & 0 \\ 0 & m_2 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} c_1 + c_2 & -c_2 \\ -c_2 & c_2 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \end{Bmatrix} - \begin{Bmatrix} 1 \\ 1 \end{Bmatrix} \ddot{x}_g + \begin{bmatrix} m_1 & 0 \\ 0 & m_2 \end{bmatrix}^{-1} \begin{Bmatrix} 1 \\ 0 \end{Bmatrix} F \quad (4.21)$$

Al aplicar el procedimiento realizado para la obtención de la ec. (4.8) se tiene que:

$$\begin{Bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \\ \ddot{x}_1 \\ \ddot{x}_2 \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ -\frac{(k_1 + k_2)}{m_1} & \frac{k_2}{m_1} & -\frac{(c_1 + c_2)}{m_1} & \frac{c_2}{m_1} \\ \frac{k_2}{m_2} & -\frac{k_2}{m_2} & \frac{c_2}{m_2} & -\frac{c_2}{m_2} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \end{Bmatrix} + \begin{Bmatrix} 0 \\ 0 \\ -1 \\ -1 \end{Bmatrix} \ddot{x}_g + \begin{Bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \\ 0 \end{Bmatrix} F \quad (4.22)$$

Compactando, la ecuación (4.22) se puede escribir:

$$\{\dot{p}\} = [A]\{p\} + \{B_s\}\ddot{x}_g + \{B_c\}u \quad (4.23)$$

donde $\{B_s\}$ es un vector de orden 4×1 que indica los pisos donde actuará la aceleración sísmica \ddot{x}_g ; $\{B_c\}$ es un vector de orden 4×1 que indica en qué pisos están instalados los dispositivos disipadores de energía para controlar la estructura, en este caso, hay un dispositivo colocado en el piso 1; u corresponde a la fuerza de control para cada instante de tiempo que se aplica usando estos dispositivos de control; u varía en el tiempo en función de $\{p\}$ y se calcula como (Ogata, 1997):

$$u = -\{G\}\{p\} \quad (4.24)$$

Esto significa que la señal de control está determinada por la respuesta en cada instante de tiempo. A esto se le llama *retroalimentación de estado*. El vector $\{G\}$ denominado de ganancia, es de orden 1×4 para el sistema de 2gdl. Manipula el voltaje que será enviado al AMR en cada instante de tiempo, para que genere las fuerzas que controlarán la estructura.

Al reemplazar la ec. (4.24) en la (4.23), se obtiene:

$$\{\dot{p}\} = [A]\{p\} + \{B_s\}\ddot{x}_g + \{B_c\}(-\{G\}\{p\}) \quad (4.25)$$

La estabilidad y respuesta del sistema se determinan a partir de los valores característicos de la matriz $[[A] - \{B_c\}\{G\}]$, denominados *polos reguladores* (Ogata, 1997) y se encuentran en el vector $\{\text{Pol}\}_{1 \times 2n}$.

Los valores del vector $\{\text{Pol}\}$ pertenecen al dominio de los números reales e imaginarios. Entre más alejados estén del eje de los números imaginarios (ordenadas) y sean preferiblemente reales y negativos, la estructura llegará más rápidamente al estado de reposo luego de una perturbación (si son valores imaginarios, sus conjugados deben ser también valores elegidos). Por el contrario, si son positivos, la respuesta se amplifica o se mantiene constante. Por lo tanto, los valores de $\{\text{Pol}\}$ de preferencia deben ser negativos. Esto puede observarse en la Figura 4.6 (Franklin *et al.*, 1994). En el presente trabajo, el vector $\{\text{Pol}\}$ se definió de manera iterativa tratando de que los valores de los voltajes generados, *vol*, estén dentro del intervalo que requiere las características del AMR.

Para el sistema de 2gdl el vector $\{\text{Pol}\}$ es:

$$\{\text{Pol}\} = \{\mu_1 \quad \mu_2 \quad \mu_3 \quad \mu_4\} \quad (4.26)$$

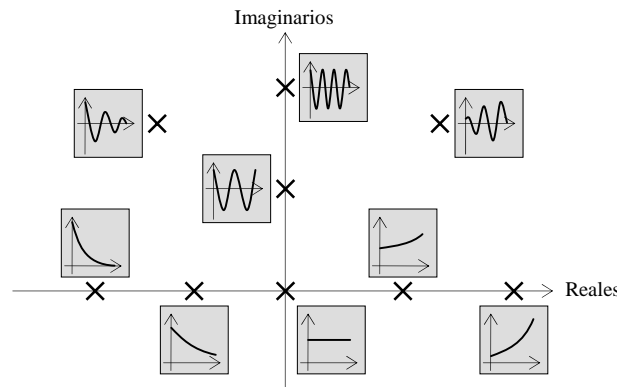


Figura 4.6. Funciones de tiempo asociadas con puntos en el plano reales-imaginarios (Franklin *et al.*, 1994).

Para que el sistema sea controlable debe cumplirse la condición de controlabilidad (Ogata, 1997):

$$\text{rango}[\{B\} \quad \{AB\} \quad \dots \quad \{A^{n-1}B\}] = 2n \quad (4.27)$$

El vector de ganancia, $\{G\}$ hace que los valores característicos de la matriz $[[A] - \{B_c\}\{G\}]$ sean los valores deseados del vector $\{\text{Pol}\}$. Los valores del vector $\{G\}$ se obtienen realizando el siguiente procedimiento (Ogata, 1997):

Se hallan los valores característicos de la matriz $[\lambda[I] - [A]]$:

$$|\lambda[I]_{2n \times 2n} - [A]_{2n \times 2n}| = \lambda^{2n} + a_1 \lambda^{2n-1} + \dots + a_{2n-1} \lambda + a_{2n} \quad (4.28)$$

Con los valores deseados del vector $\{\text{Pol}\}$ ec. (4.26), se halla el polinomio característico deseado, así:

$$(\lambda - \mu_1)(\lambda - \mu_2) \cdots (\lambda - \mu_{2n}) = \lambda^{2n} + \alpha_1 \lambda^{2n-1} + \cdots + \alpha_{2n-1} \lambda + \alpha_{2n} \quad (4.29)$$

Finalmente, el vector $\{G\}$ se determina de la siguiente manera:

$$\{G\} = \{\alpha_{2n} - a_{2n} \quad \alpha_{2n-1} - a_{2n-1} \quad \cdots \quad \alpha_2 - a_2 \quad \alpha_1 - a_1\} [T]^{-1} \quad (4.30)$$

donde la matriz $[T]$ es llamada matriz de transformación dada por (Ogata, 1997):

$$[T] = \begin{bmatrix} \{B\} & \{AB\} & \cdots & \{A^{n-1}B\} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_{2n-1} & a_{2n-2} & \cdots & a_1 & 1 \\ a_{2n-2} & a_{2n-3} & \cdots & 1 & 0 \\ \vdots & \vdots & & \vdots & \vdots \\ a_1 & 1 & \cdots & 0 & 0 \\ 1 & 0 & \cdots & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (4.31)$$

Con las ecs. (4.25) y (4.11) se calculan los desplazamientos y velocidades de los pisos del sistema con control activo sometido a la acción sísmica.

Para un sistema de n gdl controlado con una cantidad, N_{AMR} , de AMR entre el suelo y la losa del primer piso, la ec. (4.22) será:

$$\begin{Bmatrix} \{\ddot{x}\}_{nx1} \\ \{\ddot{\dot{x}}\}_{nx1} \end{Bmatrix}_{2nx1} = \begin{bmatrix} [0]_{nxn} & [I]_{nxn} \\ -[M^{-1}K]_{nxn} & -[M^{-1}C]_{nxn} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \{x\}_{nx1} \\ \{\dot{x}\}_{nx1} \end{Bmatrix}_{2nx1} + \begin{Bmatrix} \{0\}_{nx1} \\ \{-1\}_{nx1} \end{Bmatrix}_{2nx1} \ddot{x}_g + \begin{Bmatrix} \{0\}_{nx1} \\ -\frac{N_{AMR}}{m_1} \\ \{0\}_{(n-1)x1} \end{Bmatrix}_{2nx1} \begin{pmatrix} -\{G\}_{1x2n} \begin{Bmatrix} \{x\}_{nx1} \\ \{\dot{x}\}_{nx1} \end{Bmatrix}_{2nx1} \end{pmatrix} \quad (4.32)$$

donde:

$$\{B_s\} = \begin{Bmatrix} \{0\}_{nx1} \\ \{-1\}_{nx1} \end{Bmatrix}_{2nx1} \quad (4.33)$$

$$\{B_c\} = \begin{Bmatrix} \{0\}_{nx1} \\ -\frac{N_{AMR}}{m_1} \\ \{0\}_{(n-1)x1} \end{Bmatrix}_{2nx1} \quad (4.34)$$

La ec. (4.34) sólo es válida cuando los AMR se encuentran entre la base y el piso 1 de la estructura. En caso de que existan AMR en otros pisos, el vector $\{B_c\} = \{0\}_{2nx1}$ y en las filas $(n+P_{AMR})$ de este vector se reemplazan los ceros por $-N_{AMR}$ del piso correspondiente entre la masa de este. Donde P_{AMR} son los pisos donde están los AMR y N_{AMR} es la cantidad de amortiguadores en cada piso.

El proceso para calcular los desplazamientos y velocidades de los pisos de una estructura de n gdl controlada con AMR, puede representarse mediante el diagrama de bloques de la Figura 4.7. Para cada valor de \ddot{x}_g , se generan vectores $\{q\}$ y vectores de fuerza cortante de entrepiso, $\{FV\}$, para cada instante del registro sísmico. En esta figura $vol_{m\acute{a}x}$ es el voltaje máximo que requiere un AMR.

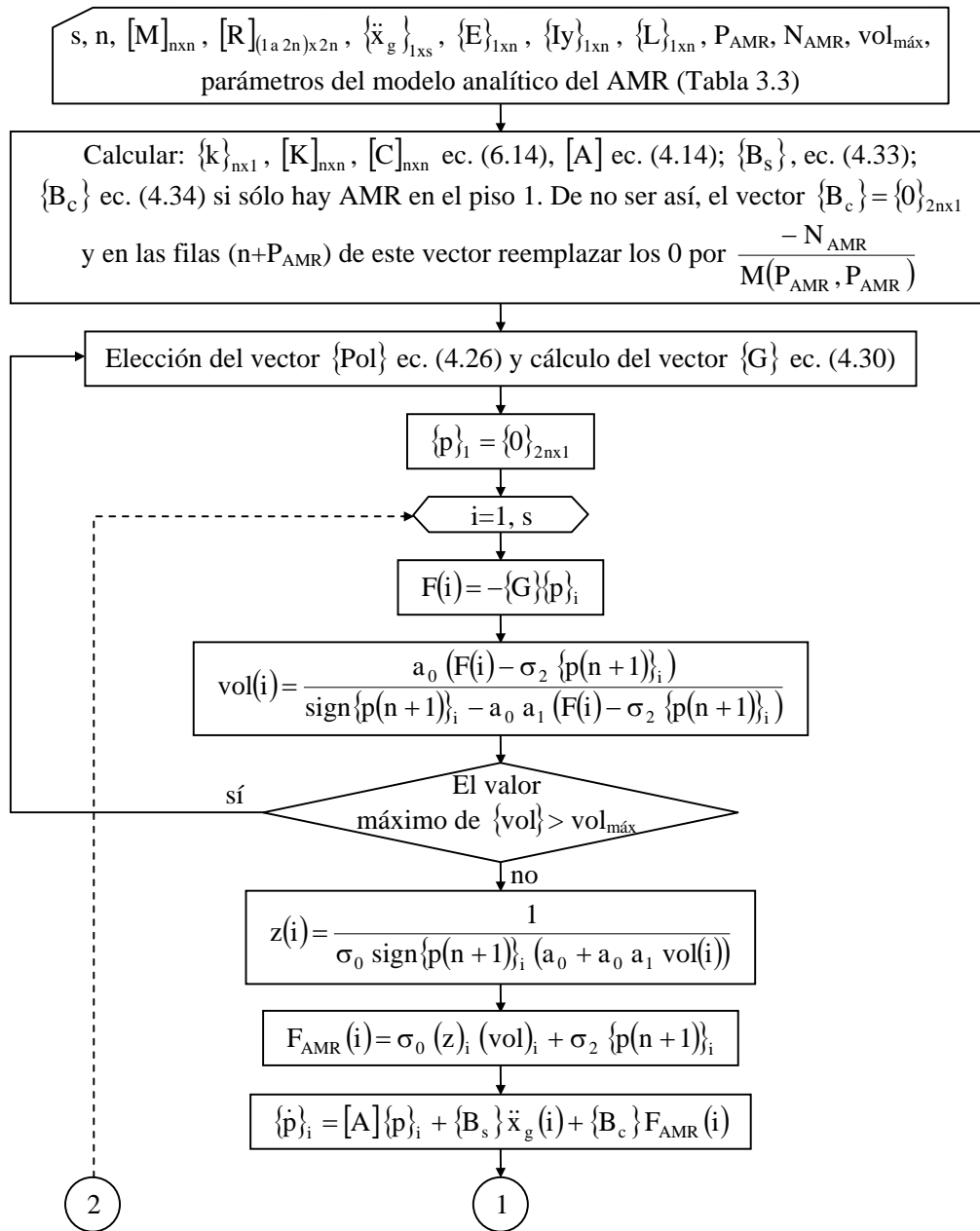


Figura 4.7. Cálculo de la respuesta estructural con control semiactivo usando AMR.

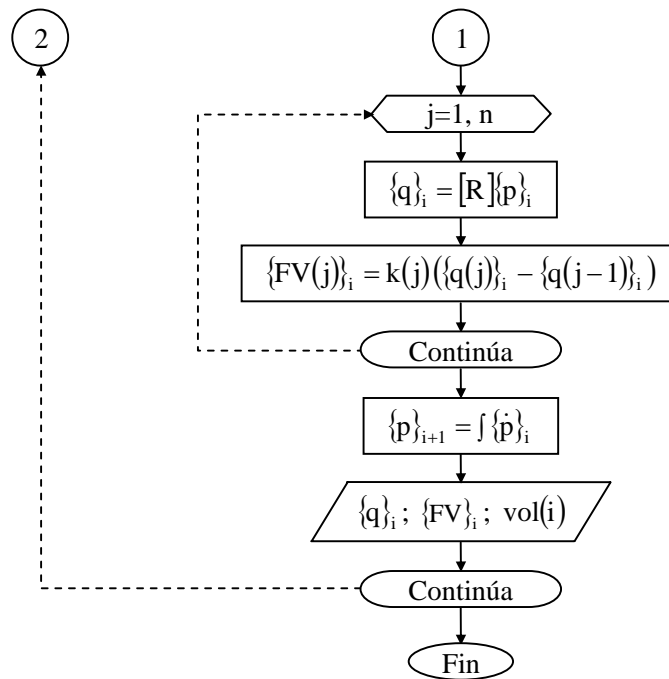


Figura 4.7. Cálculo de la respuesta estructural con control semiactivo usando AMR (continuación).

En el capítulo 6 se analiza una estructura de 5 pisos sometida a un registro sísmico. Con el uso de los procedimientos de las Figuras 4.5 y 4.7 se modeló la estructura sin control y luego controlándola con un AMR en estado semiactivo, respectivamente.

4.3 EJEMPLO DE CONTROL ACTIVO DE UN MARCO SIMPLE

Se analizó la respuesta del marco de la Figura 4.8 controlado con un AMR semiactivo, sometido al evento sísmico registrado el 19 de septiembre de 1985 en la ciudad de México en la estación de la Secretaría de Comunicaciones y Transportes, componente Este-Oeste (SCTew).

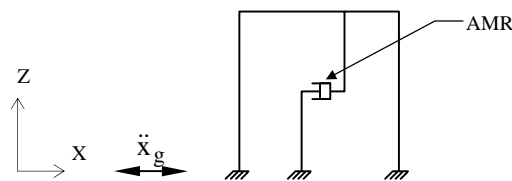


Figura 4.8. Modelo estructural estudiado.

Al suponer que la viga del marco de la Figura 4.8 es infinitamente rígida, para su análisis se puede considerar un sistema de 1gdl. Por lo tanto, $n=1$. La ec. (4.18) gobierna el equilibrio dinámico del sistema sometido a acción sísmica, y con un sistema de control activo. Al dividir la ec. (4.18) entre m , se obtiene:

$$\ddot{x} + \frac{c}{m} \dot{x} + \frac{k}{m} x = -\ddot{x}_g + \frac{F}{m} \tag{4.35}$$

Al hacer $\frac{c}{m} = 2\omega\xi$ y $\frac{k}{m} = \omega^2$, donde ω y ξ son la frecuencia de vibrar y el porcentaje del amortiguamiento crítico del sistema, respectivamente, la ec. (4.35) puede escribirse como:

$$\ddot{x} + 2\omega\xi\dot{x} + \omega^2x = -\ddot{x}_g + \frac{F}{m} \quad (4.36)$$

De la ec. (4.36) se tiene que:

$$\ddot{x} = -2\omega\xi\dot{x} - \omega^2x - \ddot{x}_g + \frac{F}{m} \quad (4.37)$$

Esta ecuación se puede escribir como:

$$\ddot{x} = \begin{Bmatrix} -\omega^2 & -2\omega\xi \end{Bmatrix} \begin{Bmatrix} x \\ \dot{x} \end{Bmatrix} - \ddot{x}_g + \frac{F}{m} \quad (4.38)$$

De esta ecuación:

$$\begin{Bmatrix} \dot{x} \\ \ddot{x} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -\omega^2 & -2\omega\xi \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} x \\ \dot{x} \end{Bmatrix} + \begin{Bmatrix} 0 \\ -1 \end{Bmatrix} \ddot{x}_g + \begin{Bmatrix} 0 \\ \frac{1}{m} \end{Bmatrix} F \quad (4.39)$$

La ecuación anterior puede representarse mediante la ec. (4.32). El vector $\{G\}$ es:

$$\{G\} = \{g_1 \quad g_2\} \quad (4.40)$$

Para conocer sólo los desplazamientos del sistema, se tiene:

$$x = \{1 \quad 0\} \begin{Bmatrix} x \\ \dot{x} \end{Bmatrix} \quad (4.41)$$

Para el sistema de 1gdl se aceptó que $T=0.5$ s, $\xi=0.05$ y $k=100$ kg/cm. Por lo tanto, $\omega=2$ Hz =12.57 rad/s.

Al aplicar los diagramas de las Figuras 4.5 y 4.7 se calcularon los desplazamientos y cortantes basales del sistema de 1gdl con $T=0.5$ s sin control y controlado con AMR, respectivamente. Para el registro sísmico empleado (SCTew), $s=8191$. Para este sistema, $n=1$ y:

$$m = \frac{k}{\omega^2} = \frac{100}{12.57^2} = 0.633 \text{ kg} \frac{\text{s}^2}{\text{cm}} \quad (4.42)$$

Las matrices $[A]$ y $[R]$ del sistema (esta última para conocer sólo sus desplazamientos), son:

$$[A] = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -157.91 & -1.25 \end{bmatrix} \quad (4.43)$$

$$[R] = \{1 \quad 0\} \quad (4.44)$$

El vector $\{B\}$ para el sistema sin control, es:

$$\{B\} = \begin{Bmatrix} 0 \\ -1 \end{Bmatrix} \quad (4.45)$$

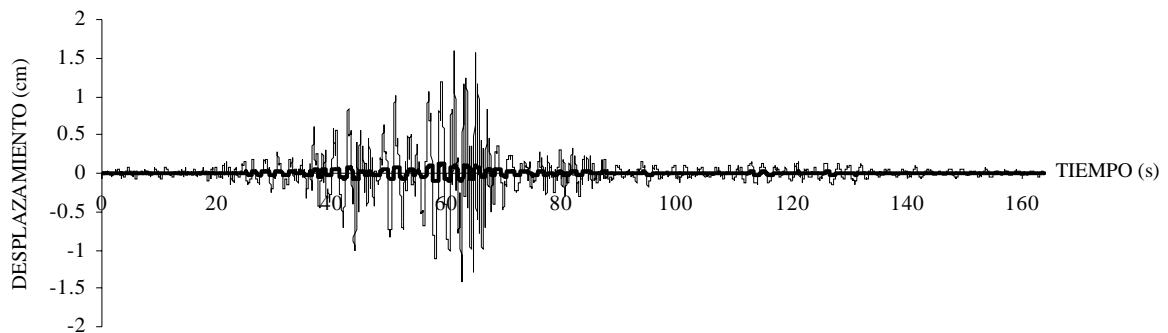
Los vectores $\{B_s\}$ y $\{B_c\}$ para el sistema controlado con AMR, son:

$$\{B_s\} = \begin{Bmatrix} 0 \\ -1 \end{Bmatrix} \quad (4.46)$$

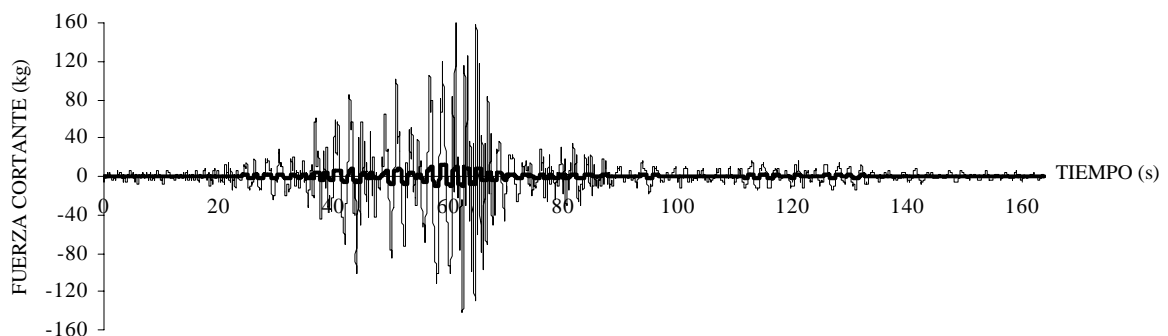
$$\{B_c\} = \begin{Bmatrix} 0 \\ 1 \\ 0.633 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} 0 \\ 1.579 \end{Bmatrix} \quad (4.47)$$

En la Figura 4.9 se muestran las historias de desplazamientos de piso (Figuras 4.9.a) y fuerza cortante basal (Figuras 4.9.b) del sistema de 1gdl con $T=0.5$ s, sometido al registro SCTew.

En ellas se puede apreciar la reducción de desplazamientos y fuerzas cortantes basales que logra el AMR en el sistema en relación con el sistema convencional. El valor máximo en la reducción de ambas respuestas fue 92%.



a) Desplazamiento lateral.



b) Fuerza cortante basal.

Figura 4.9. Historias de respuesta del sistema de 1gdl con $T=0.5$ s, sometido al registro SCTew.
 — sin control, — con AMR semiactivo.

CAPÍTULO 5

DISEÑO SÍSMICO DE ESTRUCTURAS CON AMR

El diseño sísmico convencional de edificios sigue un procedimiento general que se basa en el cumplimiento de ciertas especificaciones técnicas consignadas en reglamentos de construcción vigentes. En este trabajo, el término diseño convencional indica que en la estructura no participa ningún tipo de dispositivo disipador de energía.

Al tratar de incorporar algún dispositivo disipador de energía en la estructura, el procedimiento de diseño cambiará. Deberá conocerse la fuerza cortante basal máxima que se producirá por la incorporación del dispositivo y un criterio de diseño que tome en cuenta esto. En este capítulo se presenta una propuesta de diseño de estructuras con AMR semiactivo.

El diseño sísmico de estructuras con AMR, es un tema nuevo en México. En el Capítulo 1.12 de las Normas Técnicas Complementarias para Diseño por Sismo del Reglamento de Construcciones para el Distrito Federal (NTC-Sismo, 2004) solamente se hace mención lo relacionado con estructuras con sistemas no convencionales de resistencia sísmica.

Así, dependiendo del tipo de dispositivo que se va a utilizar, los criterios de diseño de estructuras con disipadores de energía, pueden ser diferentes. En la práctica, para diseñar estructuras con dispositivos activos o pasivos, es posible recurrir a reglamentos de construcción extranjeros (ATC-40, 1996 y FEMA-356, 2000). Por lo tanto, es necesario incluir en los reglamentos de diseño sísmico mexicanos, disposiciones que indiquen cómo hacerlo.

5.1 DISEÑO SÍSMICO ESTRUCTURAL CONVENCIONAL

El procedimiento que generalmente se lleva a cabo para el diseño sísmico convencional de estructuras, es el siguiente (Figura 5.1).

- 1. Estructuración.** Elaboración de una configuración adecuada de elementos estructurales que le proporcionen resistencia y rigidez a la estructura (Bazán y Meli, 2002).
- 2. Cálculo de cargas.** Definición de las acciones permanentes y/o accidentales que actuarán en la estructura.
- 3. Diseño preliminar.** Definición de las dimensiones de las secciones geométricas preliminares de los elementos estructurales.
- 4. Análisis sísmico.** Permite determinar qué fuerzas representan la acción sísmica sobre el edificio y qué elementos mecánicos producen en cada miembro estructural (Bazán y Meli, 2002).
- 5. Diseño.** Revisión de los elementos mecánicos en los elementos estructurales y las distorsiones de entrepiso de la estructura mediante el reglamento vigente. Estos deben cumplir con lo especificado en dichos códigos.
- 6. Dimensionamiento y detallado de elementos estructurales.** Es uno de los aspectos fundamentales del diseño sísmico
- 7. Elaboración de planos.** Con los cuales comienza la construcción de la edificación.

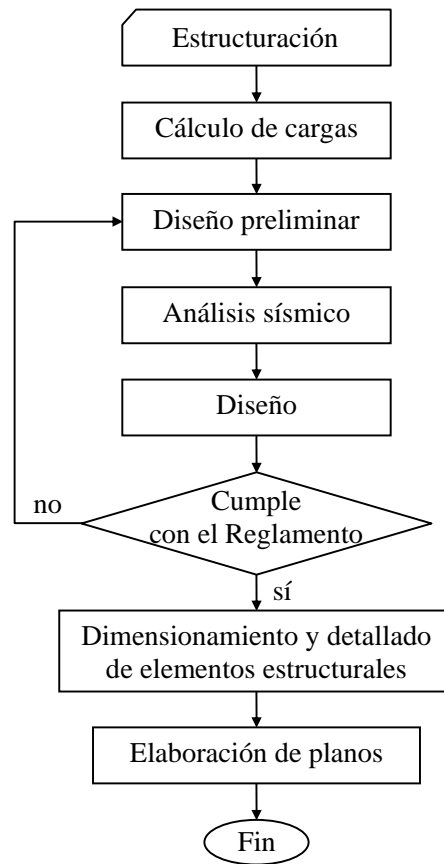


Figura 5.1. Procedimiento para el diseño convencional de estructuras.

5.2 ALTERNATIVAS DE DISEÑO SÍSMICO DE ESTRUCTURAS CON AMR

Propuesta 1. En la actualidad existen AMR que se encuentran disponibles comercialmente, con características como tamaño y capacidad de disipación de energía definidas.

Se realizará un diseño preliminar de la estructura convencional considerando tanto las cargas verticales como las sísmicas. La fuerza cortante basal será igual al producto del coeficiente sísmico, que está en función del lugar donde se ubica la estructura y del reglamento correspondiente, y del peso de la estructura. Conocida esta fuerza, se incorporan uno o varios AMR comerciales a la estructura los cuales resisten una fuerza determinada. Se analiza y se realiza el diseño final de la estructura controlada considerando nuevamente las cargas verticales y las cargas sísmicas que no logre disipar el o los AMR.

En este caso, el diseño de la estructura se adaptará a los AMR existentes.

Deberá realizarse un análisis sísmico de la estructura incluyendo el AMR y verificar el diseño por fuerza cortante de los elementos estructurales, ya que a pesar de que el amortiguador resistirá gran parte del cortante basal, el resto de este tendrá que ser resistido por los elementos estructurales.

Propuesta 2. Consiste en realizar el diseño de la estructura convencional con base en el reglamento vigente considerando únicamente las acciones permanentes. Las fuerzas sísmicas serán disipadas en su

totalidad por los AMR por lo que este tendrá que ser diseñado de acuerdo con estas. Diseñar el AMR significa fabricar uno o varios con la capacidad de carga requerida.

Deberá realizarse un análisis sísmico de la estructura incluyendo el AMR y verificar el diseño por fuerza cortante de los elementos estructurales, ya que a pesar de que el amortiguador resistirá gran parte del cortante basal, el resto de este tendrá que ser resistido por los elementos estructurales.

La información técnica requerida para la fabricación de un AMR con características específicas, es la siguiente:

a) Fuerzas

- Fuerza resistente máxima deseada cuando el amortiguador esté activado.
- Fuerza máxima resistente del amortiguador en estado pasivo.
- Limitaciones de peso del amortiguador (si existen).

b) Desplazamientos

- Desplazamiento máximo lineal deseado.
- Frecuencia y amplitud máxima de los ciclos.
- Máxima velocidad de carrera del pistón del amortiguador.

c) Dimensiones

- Longitud máxima del AMR extendido.
- Longitud mínima del AMR comprimido.
- Diámetro máximo.

d) Energía

- Voltaje máximo requerido.
- Tiempo de respuesta, en el que el dispositivo se encienda y se apague.

e) Vida útil

- Ciclos mínimos para la falla y bajo qué condiciones.
- Condiciones ambientales inusuales, como altas o bajas temperaturas en relación con su capacidad de operación, la radiación electromagnética (compuesta por rayos gamma, rayos X, radiación ultravioleta, luz visible, rayos infrarrojos, microondas y ondas de radio) y la inmersión en líquidos (agua).

Si se elige la propuesta 1, en el mercado pueden encontrarse AMR con capacidad de resistir fuerzas máximas de 60, 120 y 180 kN. El diseño y análisis de la estructura dependerá de estos amortiguadores comerciales.

En caso de que los AMR comerciales no se ajusten a las características de la estructura que será controlada, el diseño y construcción de un AMR para condiciones particulares puede resultar costoso. Sin embargo, debido a la capacidad de disipación de energía del amortiguador, las dimensiones de los elementos estructurales pueden reducirse, por lo que los costos del AMR y de los elementos estructurales podrían compensarse.

Una desventaja de las alternativas mencionadas consiste en que los elementos estructurales no estarían eventualmente en capacidad de soportar por sí solos cargas sísmicas ya que fueron diseñados para resistir cargas verticales.

Por otro lado, la inversión inicial en una estructura convencional comprende el costo de diseño y construcción. La ocurrencia de un sismo intenso puede ocasionar que el comportamiento estructural entre al intervalo inelástico y se presente algún tipo de daño (lo que implicaría sumarle a la inversión inicial el costo de reparación de la estructura) o que la estructura llegue al colapso. En este caso, además de la pérdida total del edificio, se podría tener pérdida de vidas humanas, que tiene un costo incalculable. Finalmente, el costo de esta estructura resulta ser excesivo y la recuperación de la vidas perdidas imposible.

En una estructura controlada con AMR, la inversión inicial comprende el costo del diseño y construcción de la estructura y del o los AMR. Esta inversión puede llegar a ser superior a la de un diseño típico.

Sin embargo, a largo plazo se verá la ventaja de esta inversión inicial, en la medida en que la estructura al estar sometida a sismos intensos siempre permanecerá en su intervalo elástico. Por lo tanto, su comportamiento puede estar limitado a un umbral más o menos definido. Debido a esto, no tendrá que invertirse en costos de reparación por posibles daños, ni se tendrá la incertidumbre de colapso.

5.3 PROPUESTA DE DISEÑO SÍSMICO DE ESTRUCTURAS CON AMR

La propuesta de diseño sísmico de estructuras con AMR consiste en un procedimiento iterativo con el que se determina el número mínimo de AMR comerciales, que permitan disipar una fracción del cortante basal de una estructura sometida a un sismo de gran intensidad.

El procedimiento comienza con el diseño sísmico convencional de la estructura utilizando un factor de comportamiento sísmico, $Q=1$, con el fin de que ésta se mantenga en el intervalo elástico.

Posteriormente, se elige un AMR comercial para aplicaciones estructurales, con la menor resistencia al corte. Se escoge un valor del factor de reducción, FR , de las fuerzas sísmicas de diseño. Este valor depende del criterio del diseñador y está en función de la fracción del cortante basal que se desea disipar con AMR. Se calcula la relación $V_{m\acute{a}x}/FR$, donde $V_{m\acute{a}x}$ es el cortante basal máximo obtenido del diseño convencional de la estructura.

El proceso iterativo comienza ubicando un AMR en el piso 1 en uno de los ejes de la estructura, preferiblemente en el central para no generar torsión. Con esto mediante un análisis paso a paso, se calculan los desplazamientos de piso y fuerzas cortantes de entrepiso. Se verifica si el cortante basal obtenido en la estructura con control tiene una diferencia de $\pm 5\%$ respecto a $V_{m\acute{a}x}/FR$. Si esto se logra la estructura se rediseña para un cortante basal igual a $V_{m\acute{a}x}/FR$. De lo contrario, se irán colocando AMR en el resto de ejes de la estructura, y en el resto de sus entrepisos, en ese orden.

Para cada incremento en el número de AMR se verifica que el cortante basal máximo obtenido en la estructura con control difiera $\pm 5\%$ de $V_{m\acute{a}x}/FR$. En caso de que se cumpla esta tolerancia la estructura se rediseña como se dijo en el párrafo anterior.

Si ya se colocaron AMR en todos los pisos y ejes de la estructura y no logró cumplirse la tolerancia establecida, es necesario realizar un nuevo proceso iterativo con AMR de mayor resistencia al corte o bien con un FR menor. En la Figura 5.2 se ilustra el procedimiento para el diseño sísmico de estructuras con AMR.

En la sección 6.3 se aplica esta propuesta de diseño al modelo estructural de un marco de acero de 5 pisos.

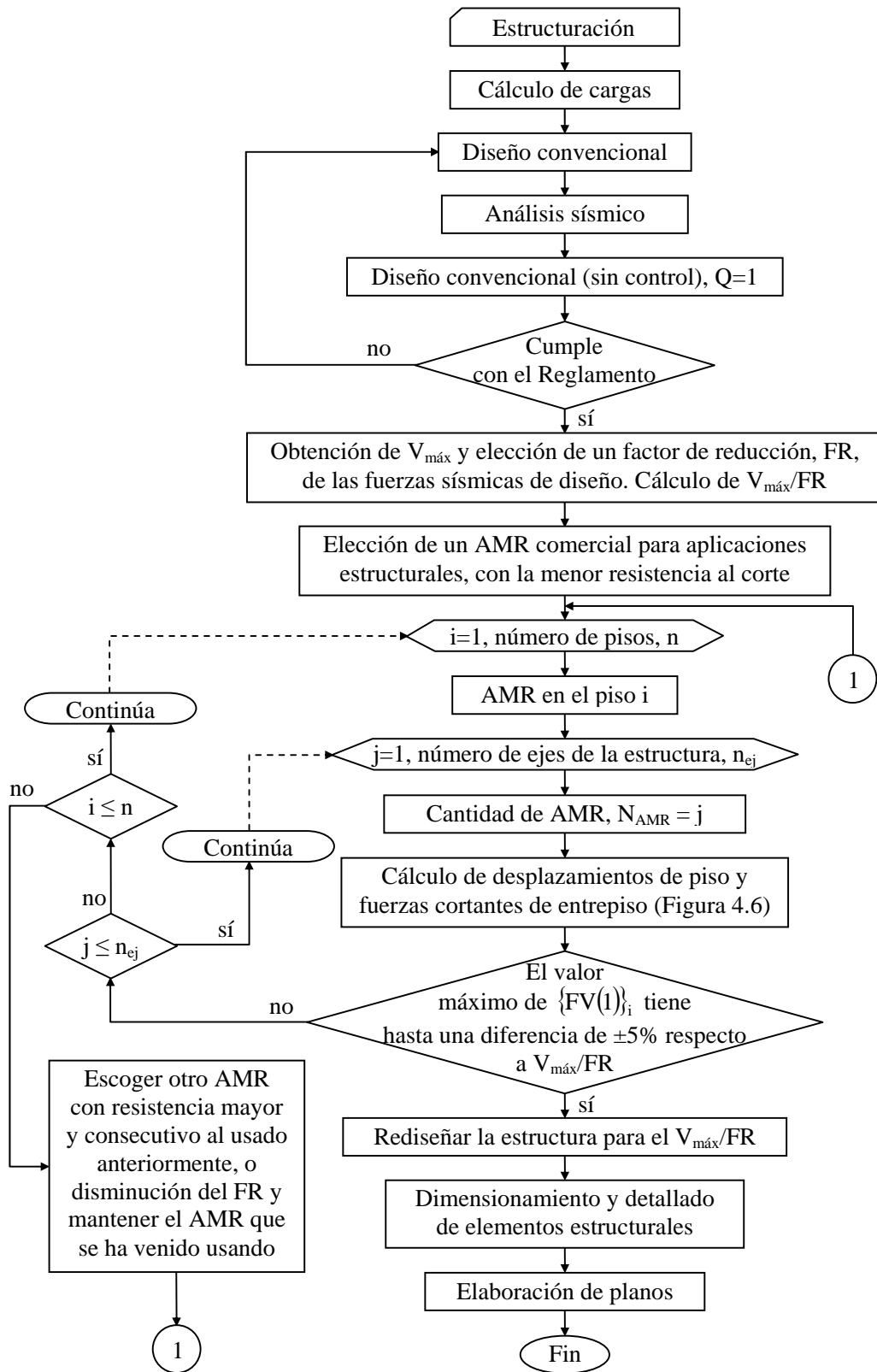


Figura 5.2. Procedimiento para el diseño de estructuras controladas con AMR.

CAPÍTULO 6

APLICACIÓN DE UN AMR A UN MODELO ESTRUCTURAL

Se describe el estudio de un modelo estructural a escala de cinco pisos controlado con un AMR semiactivo. Los análisis del modelo convencional (sin control) se realizaron con el programa ETABS (CSI, 2004) y MATLAB (The MathWorks, 2002a).

Los análisis del modelo controlado con AMR semiactivo se realizaron en MATLAB. Se sometió a 11 registros sísmicos simulados y al de SCTew de 1985 en la ciudad de México. La razón para usar este programa, fue porque el ETABS no es capaz de realizar el análisis de la estructura controlada con el AMR. Por otro lado, MATLAB tiene la capacidad de comunicarse a través de tarjetas electrónicas de adquisición de datos con sistemas de captación de señales provenientes de sensores, lo cual resulta ser útil en pruebas experimentales.

A partir de los análisis del modelo controlado con AMR semiactivo se obtuvieron los desplazamientos y fuerzas cortantes en la estructura. Estos se compararon con los obtenidos del modelo controlado con AMR pasivo y del modelo convencional, para observar los cambios con la incorporación del AMR semiactivo en el modelo.

6.1 DESCRIPCIÓN DEL MODELO ESTRUCTURAL ESTUDIADO

Es un edificio de acero estructural de cinco niveles, planta rectangular de 4.05 m x 8.10 m, con una cruzía en ambas direcciones horizontales ortogonales. Con alturas de entrepiso de 4.05 m, con un peso de 1 t/m² y empotrado en la base, por lo que no se consideraron los efectos de interacción suelo-estructura.

Para hallar las dimensiones, masas por entrepiso y el tiempo de duración del registro sísmico del modelo con respecto al prototipo, se usó la ley de escalamiento de Dove y Bennett, (1986), quienes proponen las siguientes relaciones:

$$N_E = \frac{E_{\text{prot}}}{E_{\text{mod}}} = 1 \quad (6.1)$$

$$N_{\ddot{y}} = \frac{\ddot{y}_{\text{prot}}}{\ddot{y}_{\text{mod}}} = 1 \quad (6.2)$$

$$N_h = \frac{h_{\text{prot}}}{h_{\text{mod}}} = \text{cte.} \quad (6.3)$$

$$N_m = \frac{m_{\text{prot}}}{m_{\text{mod}}} = N_h^3 \quad (6.4)$$

$$N_t = \frac{t_{\text{prot}}}{t_{\text{mod}}} = N_h; \quad N_{\Delta t} = \frac{\Delta t_{\text{prot}}}{\Delta t_{\text{mod}}} = N_h \quad (6.5)$$

donde el literal N indica que se trata de una relación entre el prototipo, prot, y el modelo, mod. Por lo tanto, N_E es la relación de módulos de elasticidad de los materiales, $N_{\ddot{y}}$ es la relación de aceleraciones; N_h y N_m son la relación de longitud y masa, respectivamente; N_t y $N_{\Delta t}$ son la relación de duración y de los intervalos constantes de tiempo del registro sísmico, respectivamente; E es el módulo de elasticidad; \ddot{y} son las aceleraciones del registro sísmico; h y m son longitud y masa, respectivamente; t y Δt son la duración y los intervalos de tiempo del registro sísmico.

Para hacer manejable al modelo, se eligió la escala de longitud, $N_h=13.5$, por lo tanto, de la ec. (6.3) se obtiene que el modelo matemático del edificio (Figura 6.1) tendrá una planta de 0.30 m x 0.60 m, y una altura de entrepiso de 0.30 m. Está construido con el mismo material del prototipo, por lo que, de la ec. (6.1), $N_E=1$.

La masa por entrepiso del prototipo es:

$$M_{\text{prot}} = \frac{(4.05 \times 8.10) \times 1000}{981} = 33.44 \text{ kg} \frac{\text{s}^2}{\text{cm}} \quad (6.6)$$

De la ec. (6.4) se obtiene la masa por entrepiso del modelo, así:

$$M_{\text{mod}} = \frac{33.44}{13.5^3} = 0.0136 \text{ kg} \frac{\text{s}^2}{\text{cm}} \quad (6.7)$$

Así, el peso del modelo por entrepiso será igual a 13.34 kg.

Con las ecs. (6.5) se obtiene la duración total del registro sísmico, t_{mod} , al que va a estar sometido el modelo y los Δt_{mod} asociados, esto es:

$$t_{\text{mod}} = \frac{t_{\text{prot}}}{13.5}; \quad \Delta t_{\text{mod}} = \frac{\Delta t_{\text{prot}}}{13.5} \quad (6.8)$$

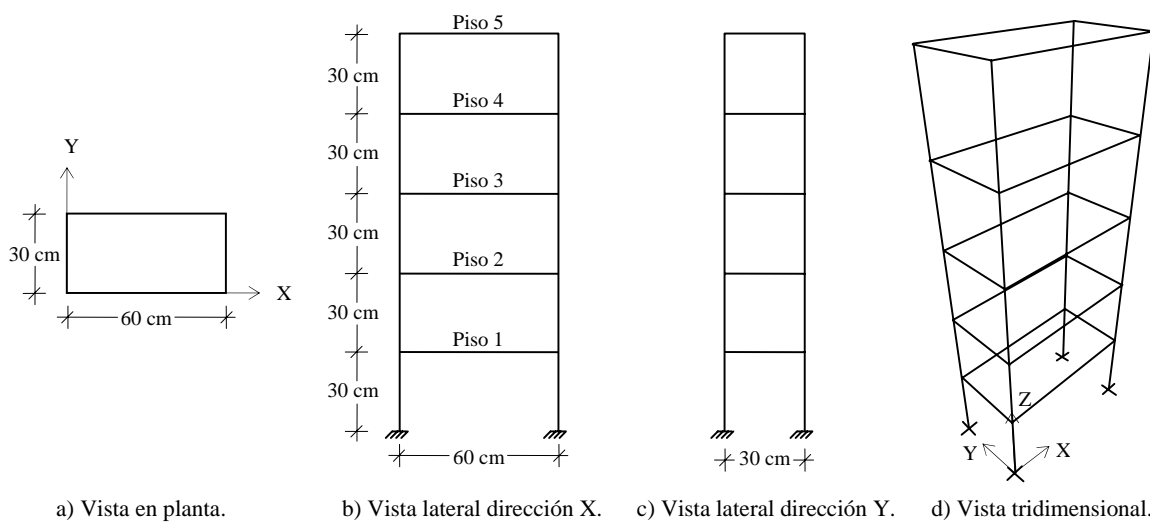


Figura 6.1. Modelo estructural estudiado.

Las dimensiones de las secciones transversales de los elementos estructurales del modelo se muestran en la Figura 6.2. El modelo se someterá a registros sísmicos sólo en dirección X, por lo que se propuso una sección transversal para las columnas mostrada en la Figura 6.2.c, cuyo momento de inercia en dirección X es pequeño comparado con el de la dirección Y, haciéndola flexible sólo en la primera dirección mencionada.

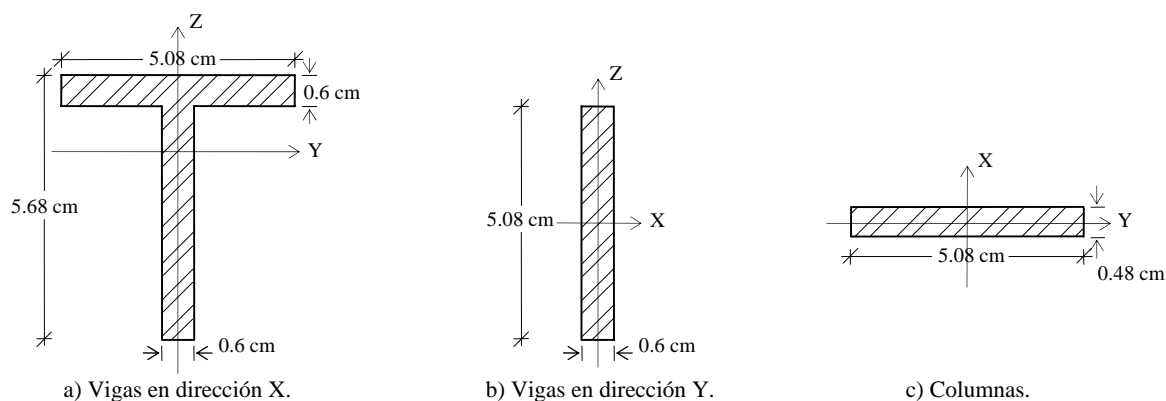


Figura 6.2. Secciones transversales de los elementos estructurales del modelo estudiado.

6.2 ANÁLISIS ESTRUCTURAL DEL MODELO CONTROLADO CON AMR

El modelo fue controlado con el AMR semiactivo descrito en la sección 3.2. En primer lugar, se verificó que las historias de respuestas del modelo convencional obtenidas de SIMULINK eran las mismas de ETABS. Para esto, se determinó si el comportamiento del modelo corresponde al de una viga de flexión o de cortante.

El comportamiento de una estructura de flexión o de cortante, está definido por el momento de inercia de las vigas y las columnas. Este efecto está definido por un parámetro ρ propuesto por Blume (Bazán y Meli, 2002) que determina si las vigas tienen rigidez suficiente para inducir puntos de inflexión en las columnas. Blume llama a este parámetro *índice de rotación de nudo*, se calcula como:

$$\rho = \frac{\sum \left(\frac{I}{L} \right)_v}{\sum \left(\frac{I}{L} \right)_c} \quad (6.9)$$

donde I es el momento de inercia de la sección transversal de un elemento y L su longitud, los subíndices v y c indican viga y columna, respectivamente. El parámetro ρ se debe calcular para cada entrepiso. Según Blume, si el resultado es mayor que 0.1 las columnas de tal entrepiso tendrán puntos de inflexión, por lo que se trata de una estructura con comportamiento de viga de cortante.

Las Tablas 6.1 y 6.2 presentan las propiedades geométricas de las columnas y las vigas del modelo estructural estudiado en dirección X, respectivamente.

Tabla 6.1. Propiedades geométricas de las columnas.

L (cm)	d (cm)	t (cm)	A (cm ²)	I _y (cm ⁴)
30	5.08	0.47	2.39	0.044

donde L es la longitud de la columna; d, t y A son el peralte, espesor y área de la sección transversal de la columna, respectivamente; e Iy el momento de inercia alrededor del eje Y de la sección.

Tabla 6.2. Propiedades geométricas de las vigas en dirección X.

L (cm)	bf (cm)	Tf (cm)	d (cm)	tw (cm)	A (cm ²)	Iy (cm ⁴)
60	5.08	0.6	5.08	0.6	5.736	13.80

donde L es la longitud de la viga; bf y tf son el ancho y espesor del patín, respectivamente; d y tw son el peralte y espesor del alma, respectivamente; A es el área de la sección transversal de la viga; e Ix el momento de inercia alrededor del eje Y.

A partir de los datos de las Tablas 6.1 y 6.2, y con el uso de la ec. (6.9), se tiene:

$$\rho = \frac{13.8024}{\frac{60}{(0.0686 + 0.0686)}} = 50.03 > 0.1 \quad (6.10)$$

Por lo que las columnas del marco formarán puntos de inflexión y se considera al marco como una estructura con comportamiento de viga de cortante de 5gdl. Las hipótesis de este planteamiento son: las vigas no se deforman a flexión en la dirección X y las masas de la estructura están concentradas en cada piso soportadas por resortes cuya rigidez corresponde a la de cada entrepiso (Figura 6.3).

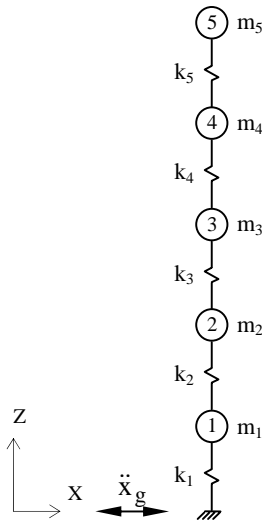


Figura 6.3. Estructura con comportamiento de viga de cortante de 5gdl.

6.2.1 Propiedades estructurales

La matriz de rigideces lateral del sistema de 5gdl, [K], se construye con las rigideces de cada entrepiso, esto es:

$$k_i = 4 \frac{12EI_y}{L^3} \quad (6.11)$$

donde E es el módulo de elasticidad del material de las columnas, en este caso es acero. La rigidez lateral de los entrepisos del modelo estructural estudiado es 586.7 kg/cm, por lo tanto la matriz de rigideces de la estructura es:

$$[K] = \begin{bmatrix} 1173.4 & -586.7 & 0 & 0 & 0 \\ -586.7 & 1173.4 & -586.7 & 0 & 0 \\ 0 & -586.7 & 1173.4 & -586.7 & 0 \\ 0 & 0 & -586.7 & 1173.4 & -586.7 \\ 0 & 0 & 0 & -586.7 & 586.7 \end{bmatrix} \frac{\text{kg}}{\text{cm}} \quad (6.12)$$

La matriz $[M]$ del sistema, es:

$$[M] = \begin{bmatrix} 0.0256 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0.0250 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0.0250 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0.0250 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0.0255 \end{bmatrix} \text{kg} \frac{\text{s}^2}{\text{cm}} \quad (6.13)$$

La matriz de amortiguamiento se construyó con el criterio de amortiguamiento de Rayleigh (Chopra, 1995), esto es:

$$[C] = \alpha[M] + \beta[K] \quad (6.14)$$

donde $[C]$ es la matriz de amortiguamiento, α y β son dos constantes que se obtienen al resolver:

$$\frac{1}{2} \begin{bmatrix} 1/\omega_1 & \omega_1 \\ 1/\omega_2 & \omega_2 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \alpha \\ \beta \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \xi_1 \\ \xi_2 \end{Bmatrix} \quad (6.15)$$

donde ξ_1 y ξ_2 , son los porcentajes de amortiguamiento de Rayleigh con relación al primer y segundo modo de vibrar. En este caso se usó para ambos el 5% del amortiguamiento crítico; ω_1 y ω_2 , son las frecuencias de vibrar del primero y segundo modo, respectivamente. Para este caso:

$$\omega_1 = 43.45 \text{ rad/s}$$

$$\omega_2 = 126.61 \text{ rad/s}$$

Al reemplazar ω_1 , ω_2 , ξ_1 y ξ_2 en la ec. (6.15), y despejando α y β , se obtiene:

$$\begin{aligned} \begin{Bmatrix} \alpha \\ \beta \end{Bmatrix} &= 2 \begin{bmatrix} 1/\omega_1 & \omega_1 \\ 1/\omega_2 & \omega_2 \end{bmatrix}^{-1} \begin{Bmatrix} \xi_1 \\ \xi_2 \end{Bmatrix} = \\ &= 2 \begin{bmatrix} 1/43.45 & 43.45 \\ 1/126.61 & 126.61 \end{bmatrix}^{-1} \begin{Bmatrix} 0.05 \\ 0.05 \end{Bmatrix} \end{aligned} \quad (6.16)$$

De donde:

$$\alpha = 3.2347 \text{ s}^{-1}$$

$$\beta = 0.000588 \text{ s}$$

Para un sistema de n gdl, el porcentaje de amortiguamiento para el n-ésimo modo del sistema es:

$$\xi_n = \frac{\alpha}{2} \frac{1}{\omega_n} + \frac{\beta}{2} \omega_n \quad (6.17)$$

Al reemplazar α y β en la ec. (6.14), resulta:

$$[C] = \begin{bmatrix} 0.77282 & -0.345 & 0 & 0 & 0 \\ -0.345 & 0.7708 & -0.345 & 0 & 0 \\ 0 & -0.345 & 0.7708 & -0.345 & 0 \\ 0 & 0 & -0.345 & 0.7708 & -0.345 \\ 0 & 0 & 0 & -0.345 & 0.42749 \end{bmatrix} \text{ kg} \frac{\text{s}}{\text{cm}} \quad (6.18)$$

Las matrices $[K]$, $[M]$ y $[C]$ contienen las propiedades estructurales del modelo estudiado de 5 pisos. Son utilizadas en el resto de este trabajo en el proceso de obtención de las respuestas de desplazamientos de piso, distorsiones y fuerzas cortantes de entrepiso del modelo en estado convencional, con AMR pasivo y semiactivo, sometido a excitaciones sísmicas.

6.2.2 Descripción del AMR empleado y ubicación en el modelo estudiado

El AMR que se empleó en este estudio es un prototipo (www.mrfluid.com). En la Figura 6.4 se presenta un esquema de este amortiguador.

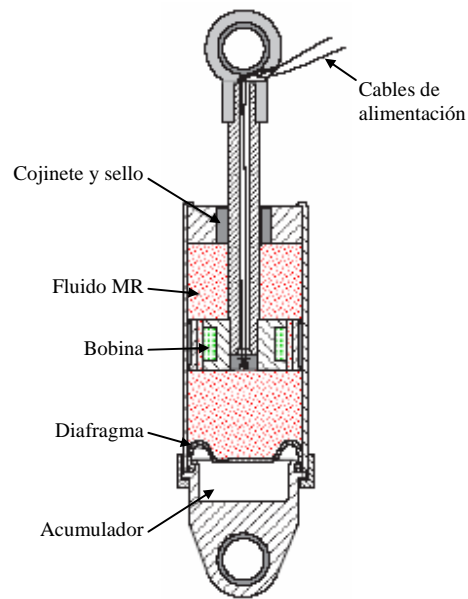
La longitud del AMR es de 21.5 cm. El cilindro principal tiene un diámetro de 3.8 cm, una carrera de ± 2.5 cm y aloja el pistón, el circuito magnético, un acumulador de gas y 50 ml de fluido MR.

El fluido MR está compuesto por partículas de hierro suspendidas en aceite de hidrocarburos, cuya densidad es de 3.28 g/cm^3 y su volumen de 50 ml.

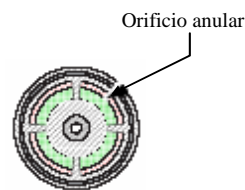
El campo magnético es generado por un electroimán colocado en la cabeza del pistón. El volumen de fluido activo sobre el que actúa el campo magnético aplicado es de 0.3 ml aproximadamente. Este campo puede variarse entre 0 y 200 kA/m para corrientes de 0 a 1 A, en la bobina cuya resistencia es de 4Ω . La potencia máxima es de 10 W, esto permite al AMR operar de forma continua por más de una hora con una batería común de 1.5 V (batería AA).

La corriente para el electroimán puede ser proporcionada por una fuente de corriente lineal de 120 V, AC generando de 0 a 1 A, lo cual es equivalente a una entrada de voltaje DC de 0 a 3 V.

Con este sistema de potencia el AMR alcanza el equilibrio reológico en menos de 6.5 ms después de aplicarse el campo magnético, lográndose fuerzas de hasta 2000 N. La saturación de este AMR en particular, es decir, el voltaje máximo que puede recibir, es alrededor de 2.25 V.



a) Corte longitudinal.



b) Sección transversal del pistón.

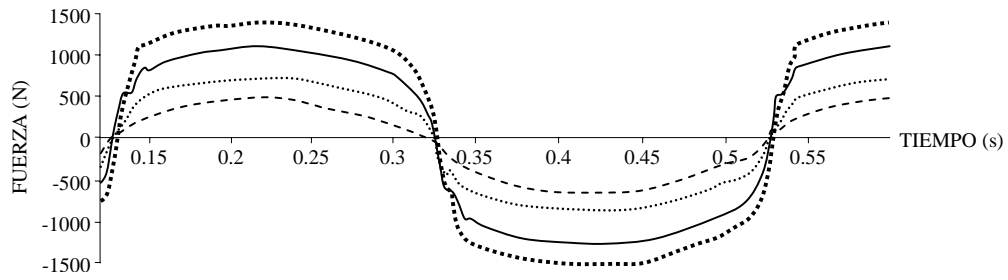
Figura 6.4. Esquema del AMR empleado en el presente estudio.

Spencer *et al.*, (1996), calcularon la respuesta de este amortiguador a una fuerza senoidal de frecuencia, $f=2.5$ Hz y una amplitud de 1.5 cm para cuatro niveles constantes de voltajes, 0 V (pasivo), 0.75 V, 1.5 V y 2.25 V. Estos voltajes corresponden a 0 A, 0.25 A, 0.5 A y 0.75 A, respectivamente. En la Figura 6.5 se muestran los resultados de estos cálculos.

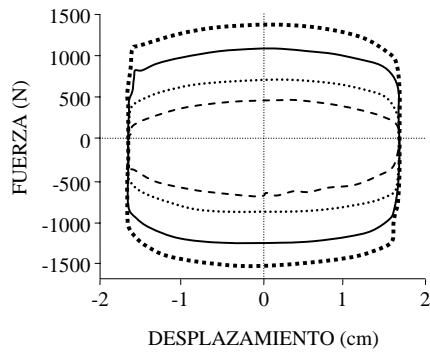
En las Figuras 6.5.a y 6.5.b, se presentan la fuerza generada en el AMR en función del tiempo y la curva fuerza-desplazamiento, respectivamente.

En ambas figuras se observan los efectos del cambio de campo magnético. Cuando es 0 V el AMR se comporta de forma pasiva, mientras se incrementa el voltaje, la fuerza requerida para que fluya el fluido MR incrementa y se comporta como un material plástico. Las curvas para los diferentes voltajes son bastante similares pero con diferentes amplitudes.

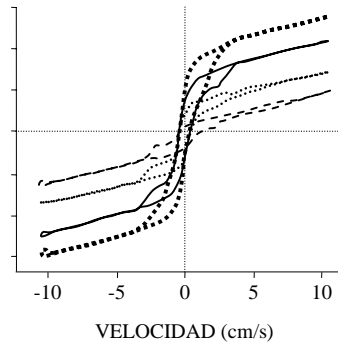
En la Figura 6.5.c, se muestra la forma de histéresis del amortiguador con la relación fuerza-velocidad del AMR, es notoria la inusual forma de este lazo alrededor del origen de la gráfica. La reproducción analítica de este comportamiento es importante para predecir la respuesta dinámica y disipación de energía del amortiguador o de un sistema dependiente de este.



a) Variación de la fuerza en el tiempo.



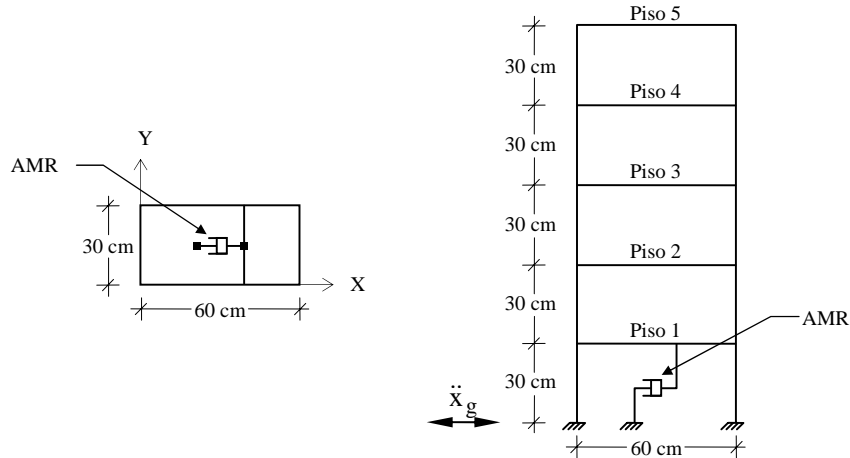
b) Variación de la fuerza con el desplazamiento.



c) Variación de la fuerza con la velocidad.

Figura 6.5. Fuerzas experimentales desarrolladas por el AMR empleado en este estudio.
 ---- 0 V (pasivo), 0.75 V, — 1.5 V, -·-·-· 2.25 V (Spencer *et al.*, 1996).

En el modelo desarrollado en el programa ETABS (CSI, 2004), el AMR se ubicó en posición horizontal entre la planta baja y el primer piso, haciendo uso de elementos barra de rigidez axial infinita (Figura 6.6).



a) Planta del piso 1 con el AMR.

b) Vista lateral en dirección X con el AMR.

Figura 6.6. Localización del AMR en el modelo estudiado.

6.2.3 Registros sísmicos considerados

Se empleó el evento sísmico del 19 de septiembre de 1985 de la ciudad de México, SCTew. Tiene una duración total de 180 s y $\Delta t=0.02$ s. Este registro fue escalado en el tiempo usando las ecs. (6.8). La duración total fue entonces $t_{mod}=13.33$ s, con un Δt_{mod} igual a 0.00148 s.

Además, fueron utilizados 11 registros sísmicos simulados con propiedades estadísticas similares al registro SCTew (Grigoriu *et al.*, 2002). Esto con el objetivo de crear un escenario sísmico en la ciudad de México, que diera una idea de posibles eventos que pueden llegar a presentarse. La simulación se realizó por un proceso en el que se toman en cuenta la evolución en el tiempo tanto de la intensidad como del contenido de frecuencias. Estos sismos tienen una duración total de 163.8 s y $\Delta t=0.04$ s, escalados en el tiempo de igual forma que el registro SCTew, por lo que su duración se redujo a un $t_{mod}=12.13$ s y $\Delta t_{mod}=0.00296$ s.

En la Figura 6.7 se muestran los espectros de respuesta de los registros sísmicos, para un porcentaje de amortiguamiento del 5% respecto al crítico, empleados en este estudio.

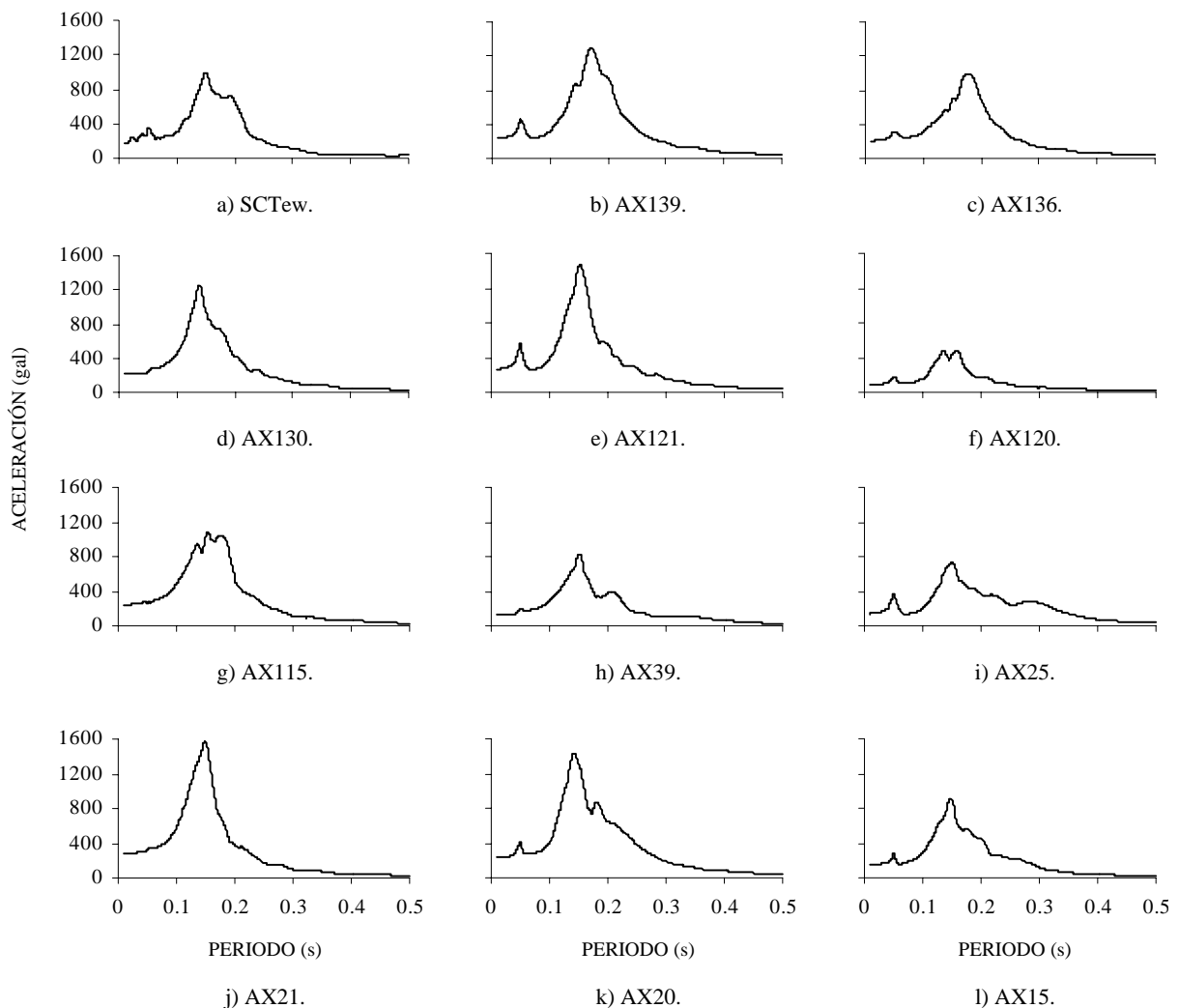


Figura 6.7. Espectros de respuesta de los registros sísmicos, para un porcentaje de amortiguamiento respecto al crítico del 5%, empleados en el presente estudio.

6.2.4 Calibración del modelo analítico estudiado

El programa MATLAB (The MathWorks, 2002a) permite el desarrollo de algoritmos, visualización, análisis de datos y cálculos numéricos. En MATLAB está integrada una plataforma para simulación y diseño basado en modelos de sistemas dinámicos llamada SIMULINK (The MathWorks, 2002b), que proporciona un entorno gráfico interactivo y un conjunto de bibliotecas de bloques que permiten diseñar, simular, implementar y probar, sistemas de control y otros sistemas variables en el tiempo.

Para realizar los análisis estructurales en SIMULINK, se calibraron las 5 frecuencias y formas modales de vibrar del modelo convencional, las historias de desplazamientos y fuerzas cortantes de entrepiso obtenidas con este programa con respecto a los del análisis en ETABS.

Siguiendo el diagrama de flujo de la Figura 4.5, a partir de las ecs. (4.12) y (4.17) se obtiene:

$$\begin{Bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \\ \dot{x}_3 \\ \dot{x}_4 \\ \dot{x}_5 \\ \ddot{x}_1 \\ \ddot{x}_2 \\ \ddot{x}_3 \\ \ddot{x}_4 \\ \ddot{x}_5 \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ -\frac{(k_1+k_2)}{m_1} & \frac{k_2}{m_1} & 0 & 0 & 0 & \frac{-(c_1+c_2)}{m_1} & \frac{c_2}{m_1} & 0 & 0 & 0 \\ \frac{k_2}{m_2} & -\frac{(k_2+k_3)}{m_2} & \frac{k_3}{m_2} & 0 & 0 & \frac{c_2}{m_2} & -\frac{(c_2+c_3)}{m_2} & \frac{c_3}{m_2} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{k_3}{m_3} & -\frac{(k_3+k_4)}{m_3} & \frac{k_4}{m_3} & 0 & 0 & \frac{c_3}{m_3} & -\frac{(c_3+c_4)}{m_3} & \frac{c_4}{m_3} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{k_4}{m_4} & -\frac{(k_4+k_5)}{m_4} & \frac{k_5}{m_4} & 0 & 0 & \frac{c_4}{m_4} & -\frac{(c_4+c_5)}{m_4} & \frac{c_5}{m_4} \\ 0 & 0 & 0 & \frac{k_5}{m_5} & -\frac{(k_5)}{m_5} & 0 & 0 & 0 & \frac{c_5}{m_5} & -\frac{(c_5)}{m_5} \end{bmatrix} \quad *$$

$$\begin{Bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ x_4 \\ x_5 \\ \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \\ \dot{x}_3 \\ \dot{x}_4 \\ \dot{x}_5 \end{Bmatrix} + \begin{Bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ -1 \\ -1 \\ -1 \\ -1 \\ -1 \end{Bmatrix} \ddot{x}_g \quad (6.19)$$

$$\{q\} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ x_4 \\ x_5 \\ \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \\ \dot{x}_3 \\ \dot{x}_4 \\ \dot{x}_5 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ x_4 \\ x_5 \end{Bmatrix} \quad (6.20)$$

6.2.4.1 Formas y frecuencias modales

En la Figura 6.8 y en la Tabla 6.3 se muestran las formas modales y las frecuencias de vibración del modelo convencional (sin control) en dirección X, obtenidas de un análisis modal con ETABS y SIMULINK.

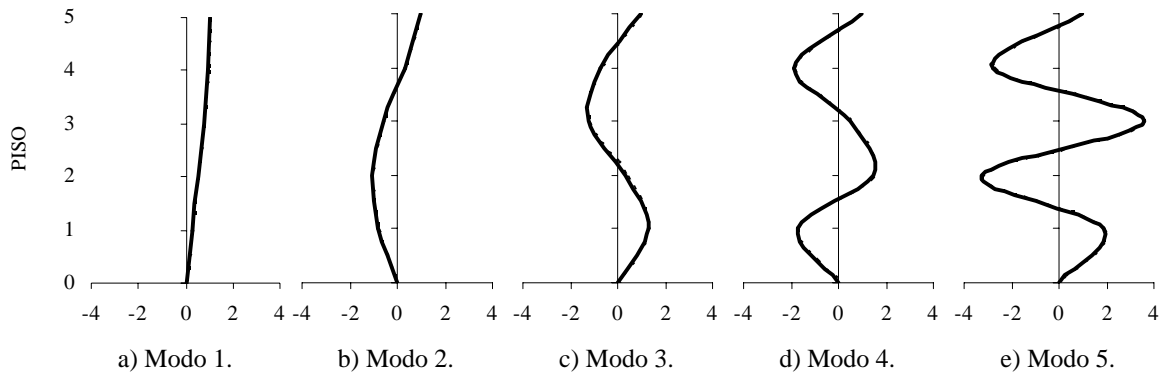


Figura 6.8. Formas modales en dirección X del modelo estudiado, calculadas con ETABS y SIMULINK, normalizadas respecto al piso 5. ---- ETABS, — SIMULINK.

Tabla 6.3. Frecuencias y periodos de vibración en dirección X del modelo convencional estudiado, calculadas con ETABS y SIMULINK.

Modo	Frecuencia (Hz)		Periodo (s)	
	ETABS	SIMULINK	ETABS	SIMULINK
1	6.8	6.9	0.15	0.15
2	20.0	20.2	0.05	0.05
3	31.3	31.7	0.03	0.03
4	40.0	40.9	0.03	0.03
5	47.6	46.7	0.02	0.02

6.2.4.2 Resultados de la calibración

Las historias de desplazamientos de piso y fuerzas cortantes de entrepiso obtenidas del análisis del modelo convencional en ETABS usando el registro sísmico SCTew fueron comparadas con las obtenidas en SIMULINK, con el objetivo de verificar la igualdad de los resultados.

Se encontró que las respuestas del modelo analizado en ambos programas fueron similares, con diferencias en amplitudes menores al 1%. Así, se desarrolló el modelo analítico en SIMULINK tomando en cuenta el AMR semiactivo.

6.2.5 Modelo analítico convencional y modelo controlado con AMR

Al aplicar un sistema de control activo a una estructura de n grados de libertad sometida a una acción sísmica, se utiliza el procedimiento ilustrado en la Figura 4.7 para hallar sus desplazamientos y velocidades en cada instante. Para el sistema de 5gdl la ec. (4.32), se expresa como:

$$\begin{Bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \\ \dot{x}_3 \\ \dot{x}_4 \\ \dot{x}_5 \\ \ddot{x}_1 \\ \ddot{x}_2 \\ \ddot{x}_3 \\ \ddot{x}_4 \\ \ddot{x}_5 \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ -(k_1+k_2) & k_2 & 0 & 0 & 0 & -(c_1+c_2) & c_2 & 0 & 0 & 0 \\ \frac{m_1}{k_2} & -\frac{m_1}{(k_2+k_3)} & \frac{k_3}{m_2} & 0 & 0 & \frac{c_2}{m_2} & -\frac{m_1}{(c_2+c_3)} & \frac{c_3}{m_2} & 0 & 0 \\ m_2 & \frac{k_3}{m_3} & -\frac{(k_3+k_4)}{m_3} & \frac{k_4}{m_3} & 0 & 0 & \frac{c_3}{m_3} & -\frac{m_2}{(c_3+c_4)} & \frac{c_4}{m_3} & 0 \\ 0 & m_3 & \frac{k_4}{m_4} & -\frac{(k_4+k_5)}{m_4} & \frac{k_5}{m_4} & 0 & 0 & \frac{c_4}{m_4} & -\frac{m_3}{(c_4+c_5)} & \frac{c_5}{m_4} \\ 0 & 0 & \frac{k_5}{m_4} & -\frac{(k_5)}{m_5} & \frac{m_4}{m_5} & 0 & 0 & \frac{c_4}{m_4} & -\frac{m_4}{m_5} & \frac{m_4}{m_5} \\ 0 & 0 & 0 & \frac{k_5}{m_5} & -\frac{(k_5)}{m_5} & 0 & 0 & 0 & \frac{c_5}{m_5} & -\frac{(c_5)}{m_5} \end{bmatrix} \quad *$$

$$* \begin{Bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ x_4 \\ x_5 \\ \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \\ \dot{x}_3 \\ \dot{x}_4 \\ \dot{x}_5 \end{Bmatrix} + \begin{Bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ -1 \\ -1 \\ -1 \\ -1 \\ -1 \end{Bmatrix} \ddot{x}_g + \begin{Bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ \frac{1}{m_1} \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{Bmatrix} F \quad (6.21)$$

donde la fuerza de control, F, es:

$$F = \{g_1 \ g_2 \ g_3 \ g_4 \ g_5 \ g_6 \ g_7 \ g_8 \ g_9 \ g_{10}\} \begin{Bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ x_4 \\ x_5 \\ \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \\ \dot{x}_3 \\ \dot{x}_4 \\ \dot{x}_5 \end{Bmatrix} = u \quad (6.22)$$

El primer vector del lado derecho de la igualdad de la ec. (6.22), es el vector de ganancias $\{G\}$, calculado para que el amortiguador genere una fuerza, u, para cada instante Δt_{mod} , que logre reducir las respuestas de la estructura (ec. 4.30).

Con el diagrama de flujo de la Figura 4.7 se modeló en SIMULINK la estructura de 5gdl controlada con AMR. Las excitaciones usadas fueron los registros sísmicos de la sección 6.2.3.

A partir de esta modelación se obtuvieron las historias de respuestas de desplazamientos y fuerzas cortantes para cada entrepiso de la estructura. Los resultados del modelo estudiado con la incorporación del AMR trabajando tanto en estado pasivo como semiactivo se presentan en las secciones siguientes.

6.2.5.1 Envolventes de desplazamientos de piso, distorsiones y fuerzas cortantes de entrepiso

En las Figuras 6.9 a 6.11, se comparan las respuestas estructurales obtenidas del modelo convencional, con AMR pasivo y semiactivo, sometido a los registros sísmicos empleados. Estas respuestas son los envolventes de desplazamientos, distorsiones y fuerzas cortantes de entrepiso, respectivamente. Puede observarse que el AMR en estado pasivo y semiactivo reduce las respuestas en comparación con las obtenidas del modelo convencional.

Las reducciones en estas respuestas son del mismo orden en los 5 pisos para cada uno de los registros sísmicos empleados. Por lo tanto, se realizó el promedio de los porcentajes de reducción de respuestas de los pisos del modelo, con el AMR pasivo y semiactivo respecto al modelo convencional (Tabla 6.4).

En la Tabla 6.4 se observa el porcentaje en la reducción de la respuesta del modelo controlado que logra el AMR semiactivo. Este varía entre 44 a 72% en los desplazamientos de piso, y de 27 a 58% en las fuerzas cortantes y distorsiones de entrepiso.

También se puede observar que la reducción lograda con el AMR pasivo, varía desde 7 hasta 27% en los desplazamientos de piso, fuerzas cortantes y distorsiones de entrepiso. Aunque estas reducciones no son de la magnitud de las generadas con el AMR semiactivo, puede asegurarse que en estructuras reales, al existir la posibilidad de falla del desempeño semiactivo del AMR, este puede disipar energía como un dispositivo pasivo.

Tabla 6.4. Porcentajes de reducción de respuestas promedio de los pisos del modelo estudiado, con el AMR pasivo y semiactivo, respecto al convencional, para los registros sísmicos empleados.

Registro sísmico	Desplazamiento de piso		Distorsión de entrepiso		Fuerza cortante de entrepiso	
	Pasivo	Semiactivo	Pasivo	Semiactivo	Pasivo	Semiactivo
SCT	24.5	65.6	24.0	43.4	24.0	43.4
AX139	18.2	63.3	18.3	44.7	18.3	44.7
AX136	4.8	44.2	5.5	27.3	5.5	27.3
AX130	26.6	71.4	26.1	54.7	26.1	54.7
AX121	21.0	70.0	21.1	55.4	21.1	55.4
AX120	18.3	65.0	18.4	27.1	18.4	27.1
AX115	7.3	55.6	6.6	32.5	6.6	32.5
AX39	20.6	68.0	19.7	43.0	19.7	43.0
AX25	23.2	69.0	23.5	48.4	23.5	48.4
AX21	22.5	69.0	21.7	56.9	21.7	56.9
AX20	27.1	72.5	26.4	58.4	26.4	58.4
AX15	26.5	71.2	26.0	54.0	26.0	54.0

En las Figuras 6.9 a 6.11 se puede observar que la magnitud máxima de reducción en desplazamientos de piso del modelo que logra el AMR semiactivo respecto al convencional llega a ser hasta 73% y para las distorsiones y fuerzas cortantes de entrepiso de 58%. También se observa la reducción que logra el AMR pasivo respecto al convencional fue 27% en desplazamientos de piso y de 26% en distorsiones y fuerzas cortantes de entrepiso. En la Figura 6.11 se puede observar que las fuerzas cortantes de entrepiso presentan forma escalonada tanto para el caso del modelo convencional como para el controlado con AMR pasivo. Sin embargo, con el AMR semiactivo, la fuerza cortante del entrepiso dos es mayor que la basal, y a partir de allí sigue escalonada hasta el entrepiso cinco. Esto se debe a que es el entrepiso donde está ubicado el AMR.

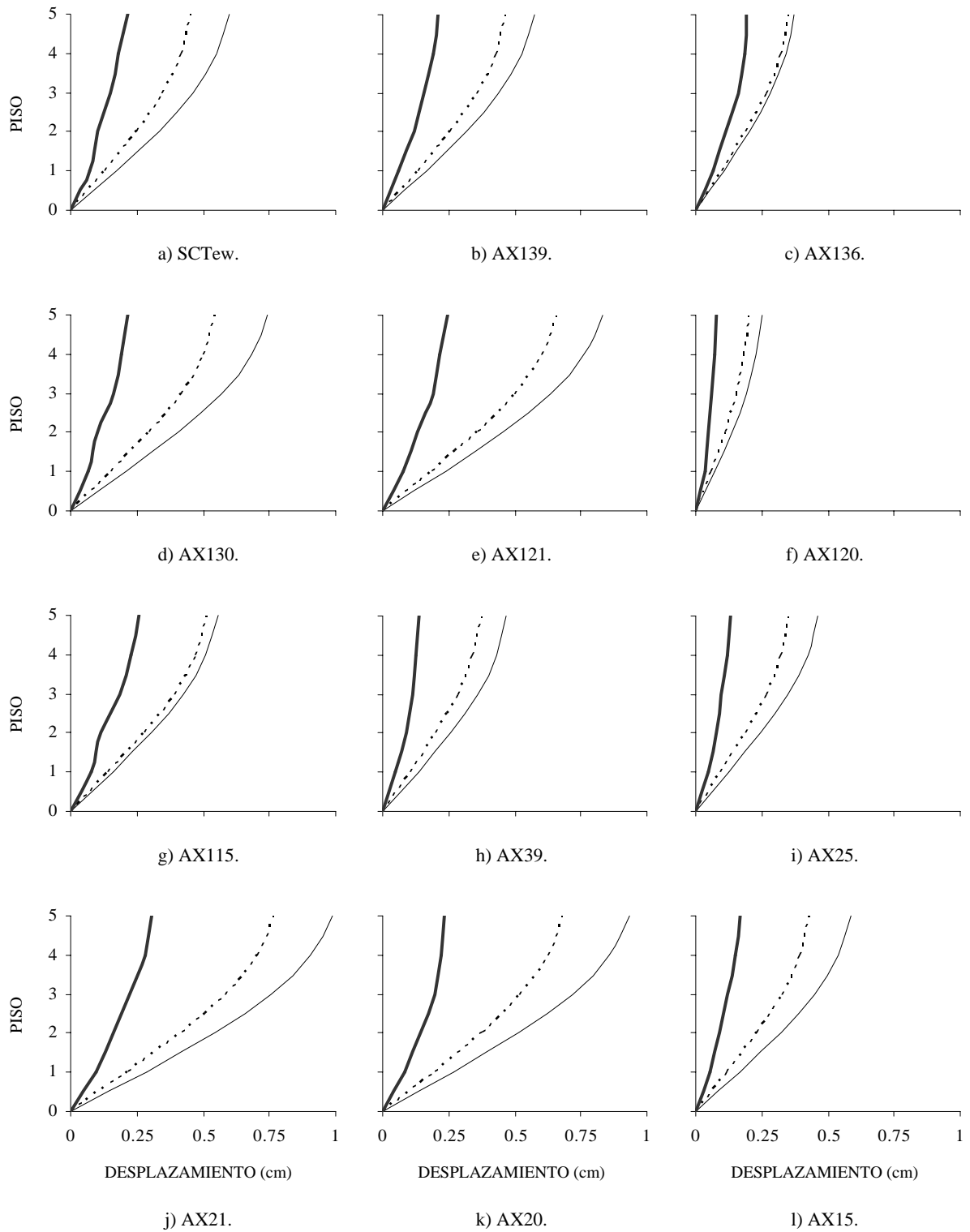


Figura 6.9. Envolventes de desplazamientos de piso del modelo, sometido a los registros sísmicos empleados. — convencional, ---- con AMR pasivo, — con AMR semiactivo.

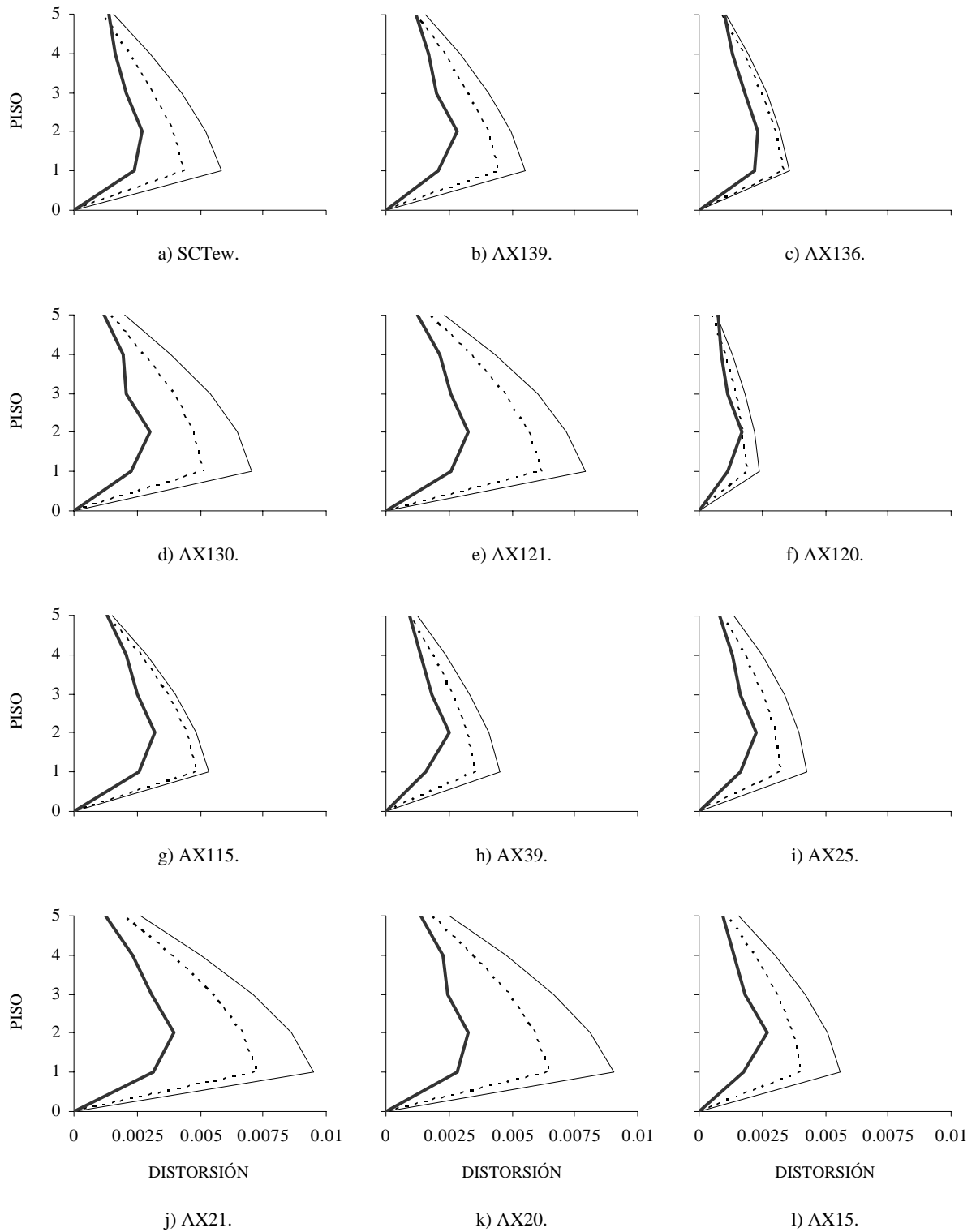


Figura 6.10. Envolturas de distorsiones de entrepiso del modelo, sometido a los registros sísmicos empleados. — convencional, ---- con AMR pasivo, — con AMR semiactivo,

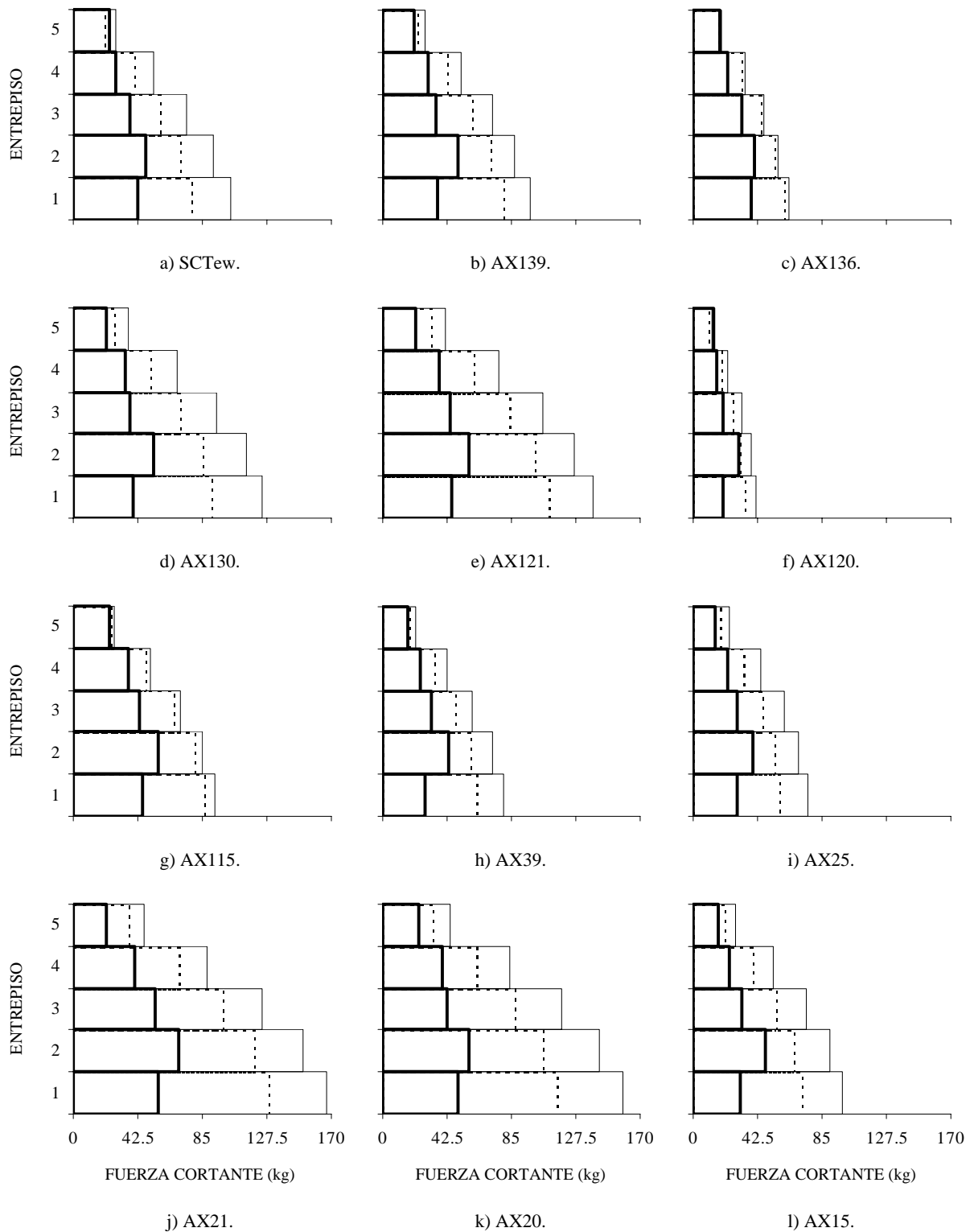


Figura 6.11. Envolturas de fuerzas cortantes de entrepiso del modelo, sometido a los registros sísmicos empleados. — convencional, - - - con AMR pasivo, — con AMR semiactivo.

6.2.5.2 Cortantes basales del modelo estudiado controlado

En la Figura 6.12, se presenta la fuerza cortante basal que se genera en el modelo controlado con el AMR pasivo y semiactivo sometido a los registros sísmicos empleados.

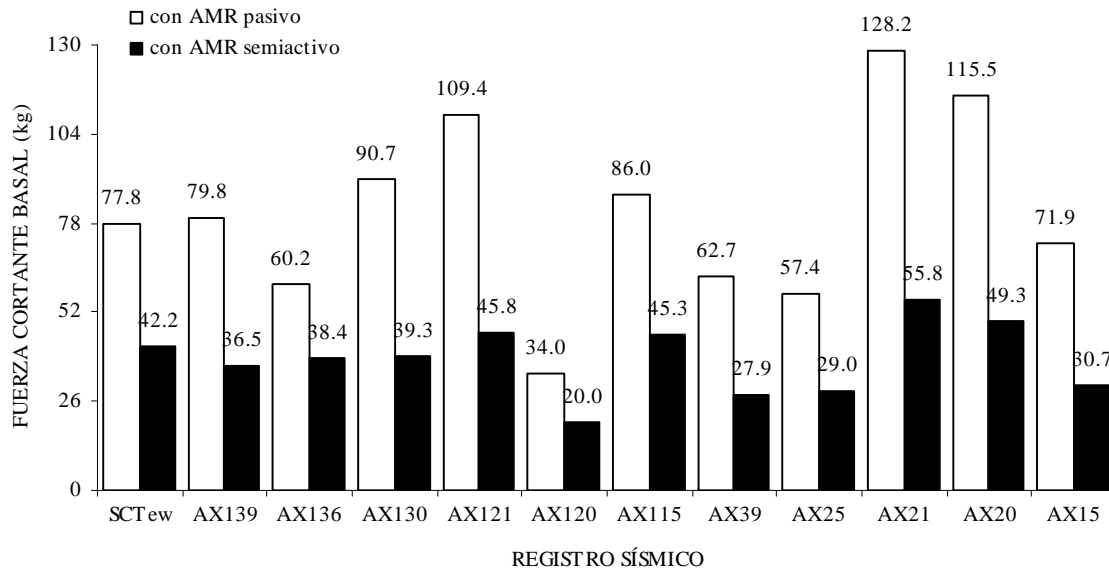


Figura 6.12. Cortante basal en el modelo controlado con el AMR pasivo y semiactivo sometido a los registros sísmicos empleados.

Se observa que en ambos casos de control, el cortante basal máximo se presenta para el registro sísmico AX21, que es el más intenso. En este caso, el cortante basal con el que podría ser diseñada la estructura en estudio, es el generado por el sismo AX21 con el AMR pasivo, con el objetivo de ser conservadores en el diseño de la misma. La relación entre el cortante demandado con el AMR pasivo y con el AMR semiactivo es:

$$\frac{V_{b \text{ AMR pasivo}}}{V_{b \text{ AMR semiactivo}}} = \frac{128.2 \text{ kg}}{55.8 \text{ kg}} = 2.3 \quad (6.23)$$

En la sección 6.3 se aplica la propuesta de diseño sísmico de estructuras con AMR de la sección 5.3 al modelo estudiado.

6.2.5.3 Historias de desplazamientos de piso y fuerzas cortantes de entrepiso

En las Figuras 6.13 y 6.14 se presenta la historia de desplazamientos de piso y en las Figuras 6.15 y 6.16 las historias de fuerzas cortantes de entrepiso, del modelo controlado con AMR semiactivo y pasivo, respectivamente, en la fase más intensa de las respuestas que está en el intervalo de 2 a 7 s. Ambas historias se comparan con la respuesta del modelo en estado convencional sometidos al registro sísmico más intenso AX21.

En estas figuras se puede observar que ambos tipos de control reducen la respuesta del modelo respecto a la respuesta sin control. Sin embargo, la reducción con el AMR semiactivo es mucho mayor que con el AMR pasivo.

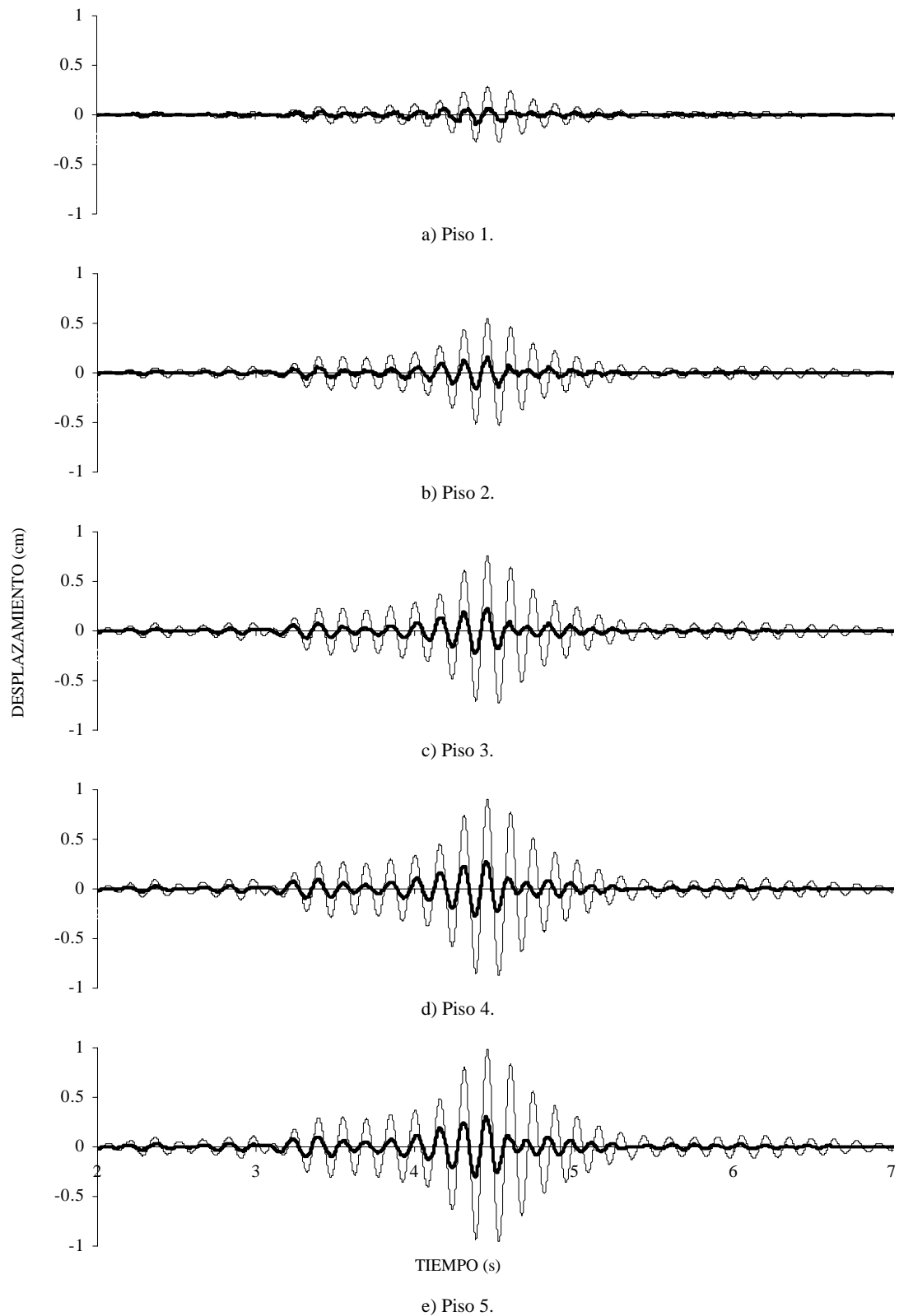


Figura 6.13. Historia de desplazamientos de piso del modelo estudiado en estado convencional y controlado, sometido al registro sísmico AX21. — convencional, — con 1 AMR semiactivo.

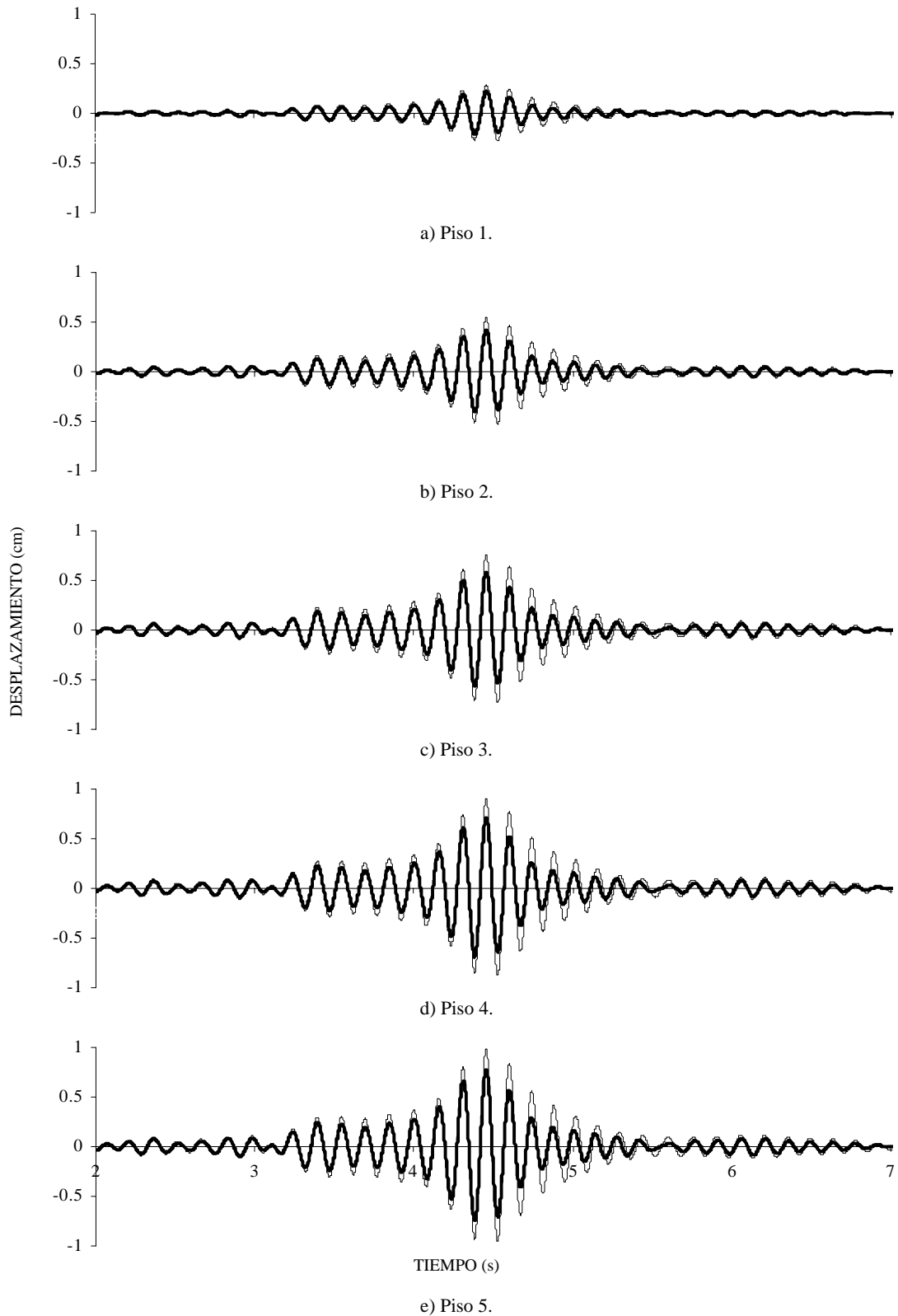


Figura 6.14. Historia de desplazamientos de piso del modelo estudiado en estado convencional y controlado, sometido al registro sísmico AX21. — convencional, — con 1 AMR pasivo.

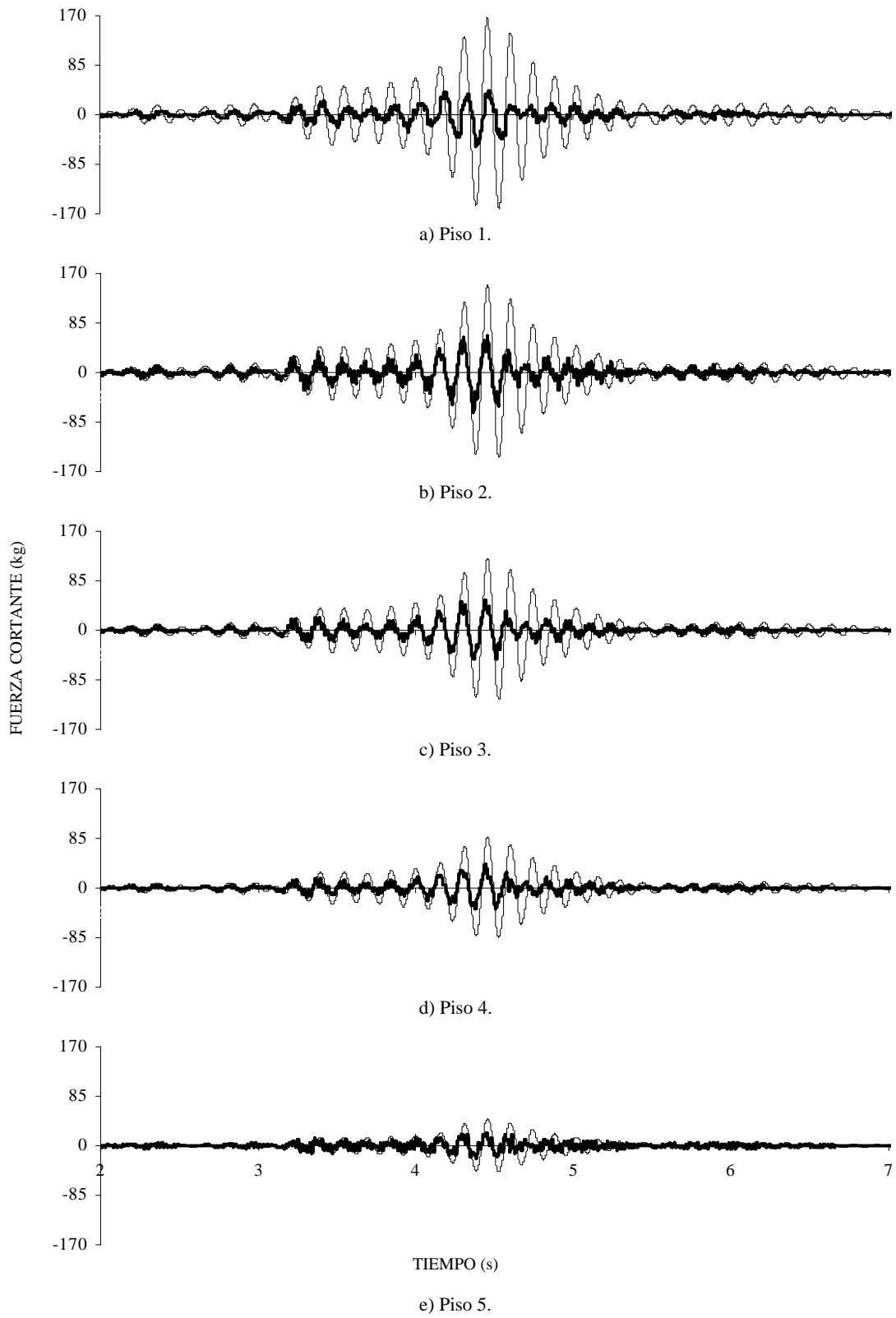


Figura 6.15. Historia de fuerzas cortantes de entrepiso del modelo en estado convencional y controlado, sometido al registro sísmico AX21. — convencional, — con 1 AMR semiactivo.

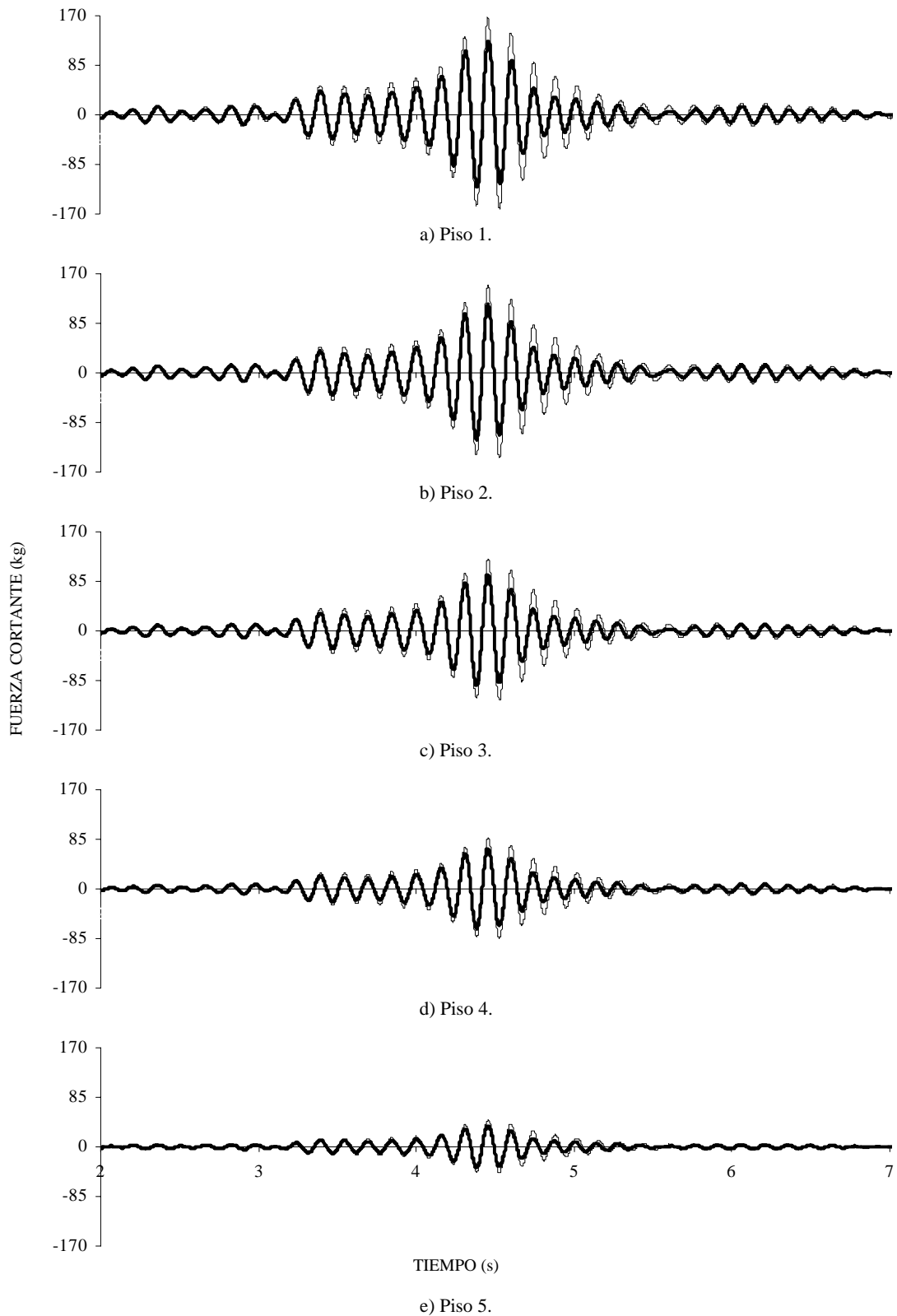


Figura 6.16. Historia de fuerzas cortantes de entrepiso del modelo en estado convencional y controlado, sometido al registro sísmico AX21. — convencional, — con 1 AMR pasivo.

6.2.5.4 Amortiguamiento viscoso equivalente

Para calcular el amortiguamiento del modelo estructural analítico en estado convencional, con AMR pasivo y semiactivo, se sometió a una fuerza de impulso obteniendo la historia de desplazamientos en vibración libre. El valor del amortiguamiento viscoso, ξ , se obtuvo como (Chopra, 1995):

$$\xi = \frac{1}{2\pi j} \ln \frac{x_i}{x_{i+j}} \tag{6.24}$$

donde x es un desplazamiento máximo y los subíndices i y j , indican el número de x y el número de ciclo entre valores máximos, respectivamente.

En la Figura 6.17 se muestra el decremento logarítmico en el modelo en estado convencional, con AMR pasivo y semiactivo, en vibración libre. Se puede observar que la estabilidad con el AMR semiactivo se logra con menos oscilaciones de menor amplitud en menos tiempo que con el uso del AMR pasivo y se alcanza mucho más rápido y con solo tres oscilaciones notorias.

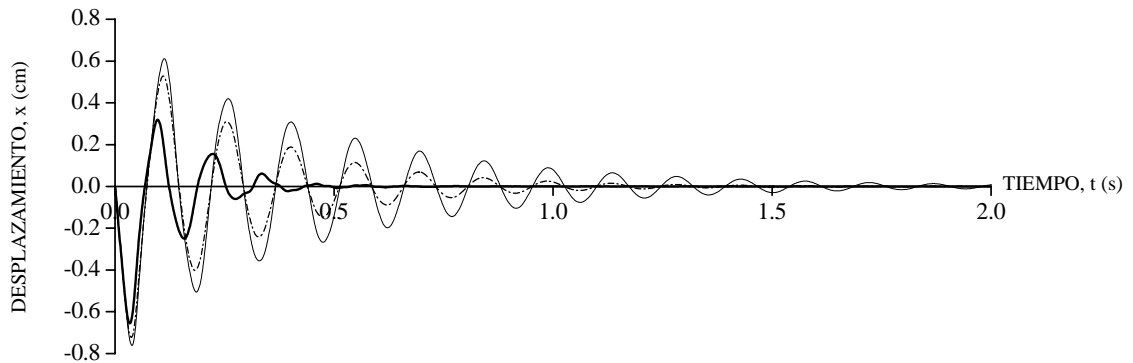


Figura 6.17. Desplazamientos del modelo en estado convencional y controlado, en vibración libre.
 — convencional, con AMR pasivo, — con AMR semiactivo.

La Tabla 6.5 presenta los valores de los desplazamientos máximos positivos y el tiempo en que suceden, del modelo en vibración libre en estado convencional, con AMR pasivo y semiactivo, medidos de la Figura 6.17.

Tabla 6.5. Desplazamientos máximos del modelo en vibración libre en estado convencional, con AMR pasivo y semiactivo, medidos de la Figura 6.15.

Máximo, i	Convencional		AMR pasivo		AMR semiactivo	
	t (s)	x (cm)	t (s)	x (cm)	t (s)	x (cm)
1	0.11	0.61	0.11	0.53	0.10	0.32
2	0.26	0.42	0.26	0.31	0.22	0.16
3	0.40	0.31	0.40	0.19	0.34	0.06
4	0.55	0.23	0.55	0.11	0.00	0.00
5	0.70	0.17	0.70	0.07	0.00	0.00

En la Tabla 6.6 se calcula el amortiguamiento del modelo estructural empleando la ec. (6.24), Así, el amortiguamiento del modelo en estado convencional es de 2.8%; con la incorporación del AMR pasivo aumenta a 4.3%; con el AMR semiactivo es de 16.3%. El AMR semiactivo logra la estabilidad del modelo en menos tiempo comparado con el modelo convencional y con el AMR pasivo.

Tabla 6.6. Cálculo del amortiguamiento del modelo estructural en estado convencional, con AMR pasivo y semiactivo.

j	$\frac{1}{2\pi j}$	Convencional				AMR pasivo				AMR semiactivo					
		x_i (cm)	x_{i+j} (cm)	$\ln \frac{x_i}{x_{i+j}}$	ξ_i (%)	x_i (cm)	x_{i+j} (cm)	$\ln \frac{x_i}{x_{i+j}}$	ξ_i (%)	x_i (cm)	x_{i+j} (cm)	$\ln \frac{x_i}{x_{i+j}}$	ξ_i (%)		
1	0.16	0.61	0.42	0.38	6.0	0.53	0.31	0.53	8.4	0.32	0.16	0.72	11.4		
2	0.08	0.42	0.31	0.31	2.5	0.31	0.19	0.50	4.0	0.16	0.06	0.93	7.4		
3	0.05	0.31	0.23	0.29	1.5	0.19	0.11	0.50	2.7	0.06	0.00	8.72	46.3		
4	0.04	0.23	0.17	0.31	1.2	0.11	0.07	0.50	2.0	0.0	0.0	0.0	0.0		
ξ_{conv} promedio =					2.8	ξ_{pasv} promedio =					4.3	ξ_{AMR} promedio =			16.3

6.3 APLICACIÓN DE LA PROPUESTA DE DISEÑO SÍSMICO DE ESTRUCTURAS CON AMR AL MODELO ESTUDIADO

La propuesta de diseño sísmico de estructuras con AMR (Figura 5.2), fue aplicada al marco de 5 pisos en estudio. Se eligió una reducción del 95% en las fuerzas sísmicas de diseño generadas en el modelo convencional con diseño elástico. El registro sísmico empleado fue el AX21.

El cortante basal máximo obtenido con el diseño elástico convencional fue $V_{m\acute{a}x}=167.21$ kg. Para lograr el porcentaje de reducción de las fuerzas de diseño mencionado, el factor de reducción, $FR=22$. Así, $V_{m\acute{a}x}/FR=7.6$ kg.

Como dicha propuesta consiste en un proceso iterativo, se inició con un AMR colocado en el primer entrepiso. El cortante basal obtenido fue $V_{m\acute{a}x}=55.78$ kg (Figura 6.11.j). Este valor es mayor que $V_{m\acute{a}x}/FR$, por lo que no cumple la reducción deseada.

Por lo anterior, y siguiendo con el proceso iterativo de diseño con AMR, se adicionó otro amortiguador entre los pisos 1 y 2. Con este arreglo se obtuvo un $V_{m\acute{a}x}=7.34$ kg. El porcentaje de error con respecto a $V_{m\acute{a}x}/FR$ fue de 3%, lo cual está dentro de la tolerancia establecida ($\pm 5\%$).

Una vez encontrado el número adecuado para cumplir con el objetivo de esta propuesta de diseño, en las siguientes secciones se comparan y comentan las respuestas del modelo convencional y controlado con 2 AMR semiactivos.

6.3.1 Envoltentes de desplazamientos de piso, distorsiones y fuerzas cortantes de entrepiso

En la Figura 6.18 se presentan los envoltentes de desplazamientos de piso, distorsiones y fuerzas cortantes de entrepiso, con el uso de 2 AMR en el modelo. Se puede observar la magnitud de la reducción que se presenta en las respuestas con el uso de 2 AMR semiactivos, en comparación con el modelo convencional. En la Figura 6.18.c, se puede observar que la fuerza cortante de los pisos 1 y 2 es menor que la del 3 y a partir de allí disminuye hasta el último piso. Esto se debe a que en los dos primeros entrepisos es donde se ubican los AMR.

En la Tabla 6.7 se presentan los porcentajes de reducción de respuestas de los pisos del modelo estudiado, con los 2 AMR en estado pasivo y semiactivo, respecto al convencional. El porcentaje máximo de reducción fue 96% en el piso 1 con 2 AMR semiactivos, en desplazamientos de piso, distorsiones y fuerzas cortantes de entrepiso. Con los AMR pasivos esta reducción fue 47%. El desplazamiento del piso 5 con los AMR semiactivos la reducción fue de 77%, y de 45% con los pasivos.

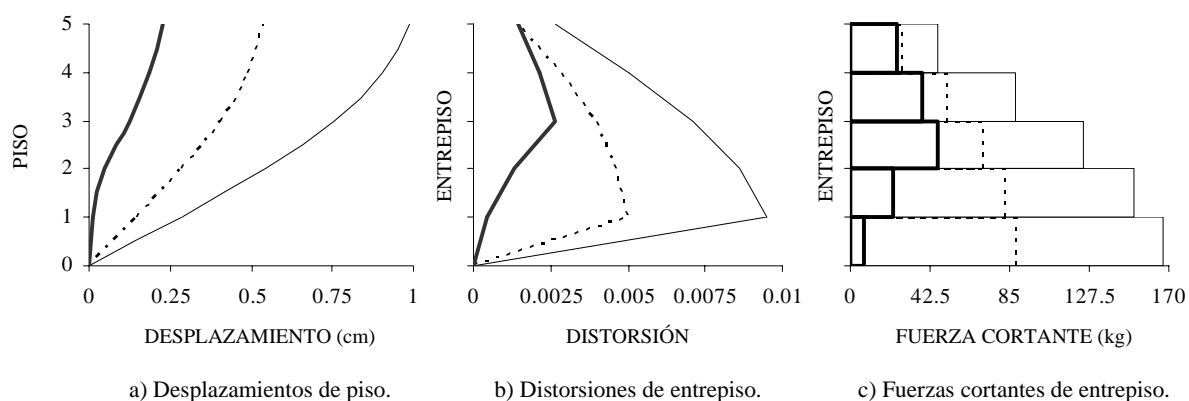


Figura 6.18. Envolventes de respuestas del modelo estudiado sometido al registro sísmico AX21. — convencional, ---- con 2 AMR pasivos, — con 2 AMR semiactivos.

Tabla 6.7. Porcentajes de reducción de respuestas de los pisos del modelo estudiado, con el AMR pasivo y semiactivo, respecto al convencional, sometido al registro sísmico AX21.

Piso	Desplazamiento de piso		Distorsión de entrepiso		Fuerza cortante de entrepiso	
	Pasivo	Semiactivo	Pasivo	Semiactivo	Pasivo	Semiactivo
1	47	96	47	96	47	96
2	47	91	46	85	46	85
3	46	84	43	63	43	63
4	46	80	43	57	43	57
5	45	77	43	45	43	45

6.3.2 Historias de desplazamientos de piso y fuerzas cortantes de entrepiso

En las Figuras 6.19 y 6.20 se presenta la historia del desplazamiento de piso y en las 6.21 y 6.22 las de fuerzas cortantes de entrepiso, del modelo con AMR semiactivo y pasivo, respectivamente. Ambas historias en la fase más intensa de las respuestas. En estas figuras se dibuja la respuesta del modelo en estado convencional.

Se puede observar que el porcentaje de reducción que logran los AMR semiactivos en el modelo es aproximadamente el doble del que producen los AMR pasivos, que a su vez, reducen la mitad de la respuesta del modelo convencional.

6.3.3 Elementos mecánicos

Con un análisis del modelo estudiado controlado con 2 AMR, sometido al sismo simulado más intenso que corresponde al AX21, se calcularon sus elementos mecánicos en estado convencional, con AMR pasivo y semiactivo.

En las Figuras 6.23 a 6.25, se muestran los envolventes de los elementos mecánicos para el modelo en estado convencional, con AMR pasivo y semiactivo, respectivamente, de un marco del modelo en dirección X.

Se puede observar que la disminución, tanto en momentos flexionantes como en fuerzas cortantes en los elementos estructurales del primer entrepiso, que logra el AMR semiactivo es del orden de 96% y del 47% con el AMR pasivo, ambos respecto al convencional.

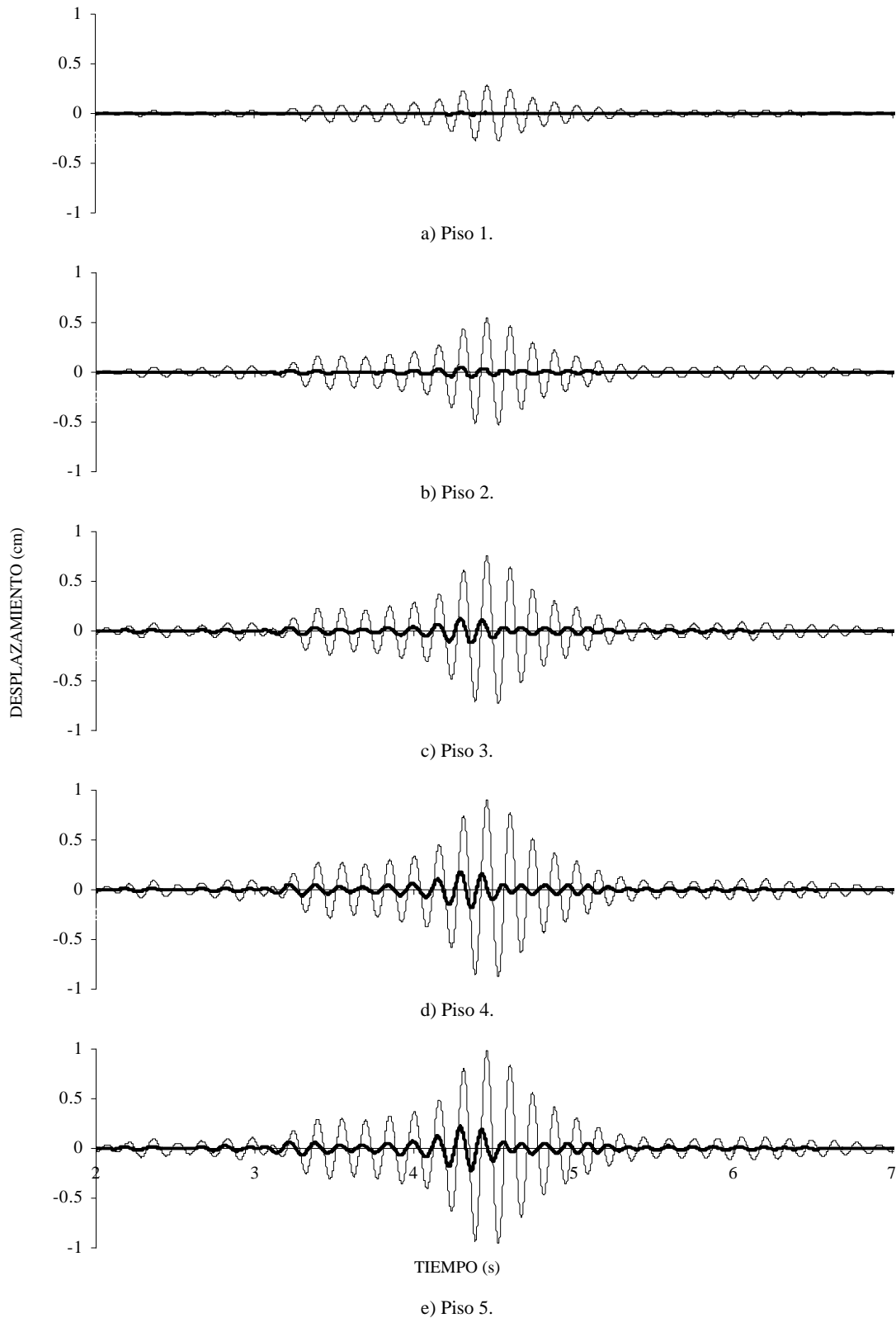


Figura 6.19. Historia de desplazamientos de piso del modelo estudiado en estado convencional y controlado, sometido al registro sísmico AX21. — convencional, — con 2 AMR semiactivos.

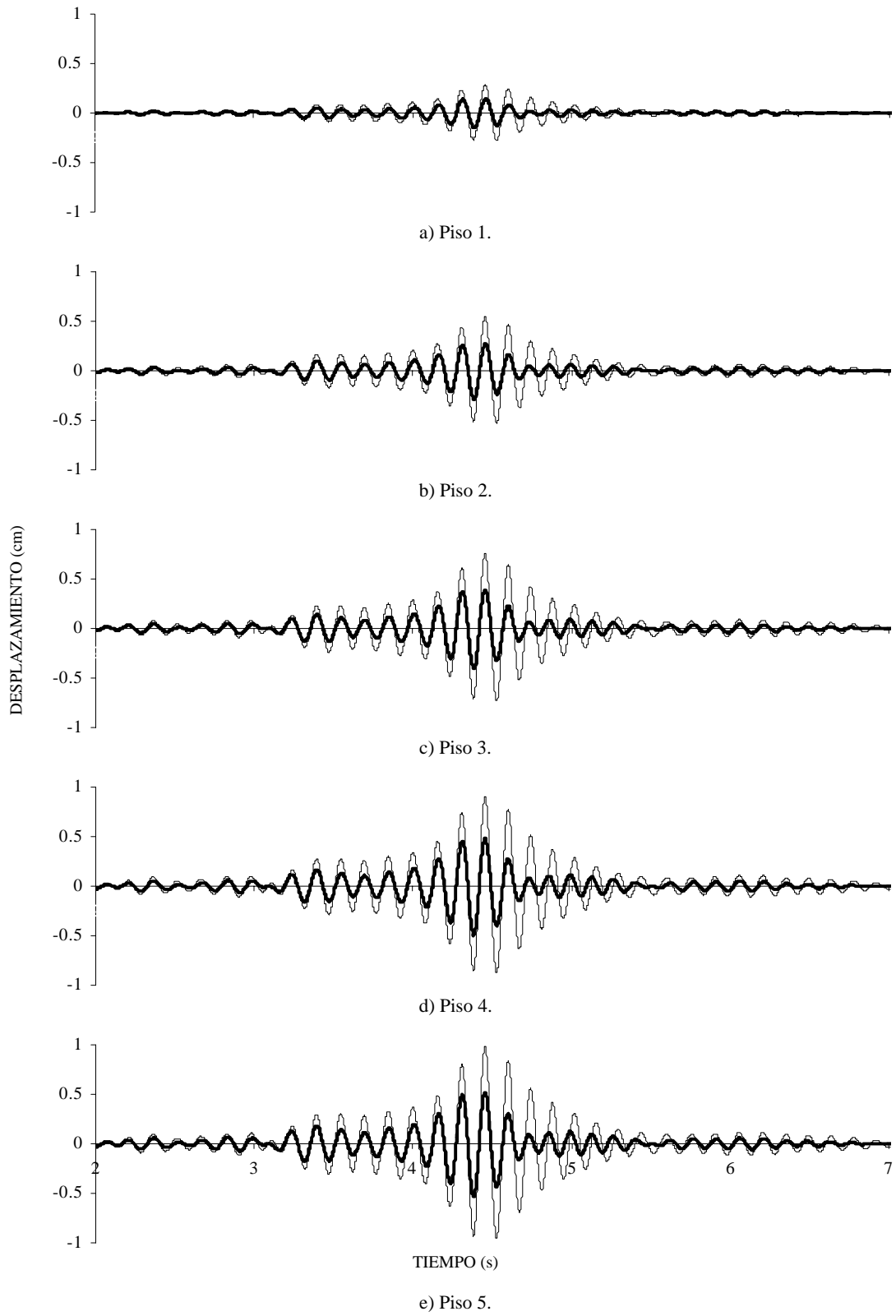


Figura 6.20. Historia de desplazamientos de piso del modelo estudiado en estado convencional y controlado, sometido al registro sísmico AX21. — convencional, — con 2 AMR pasivos.

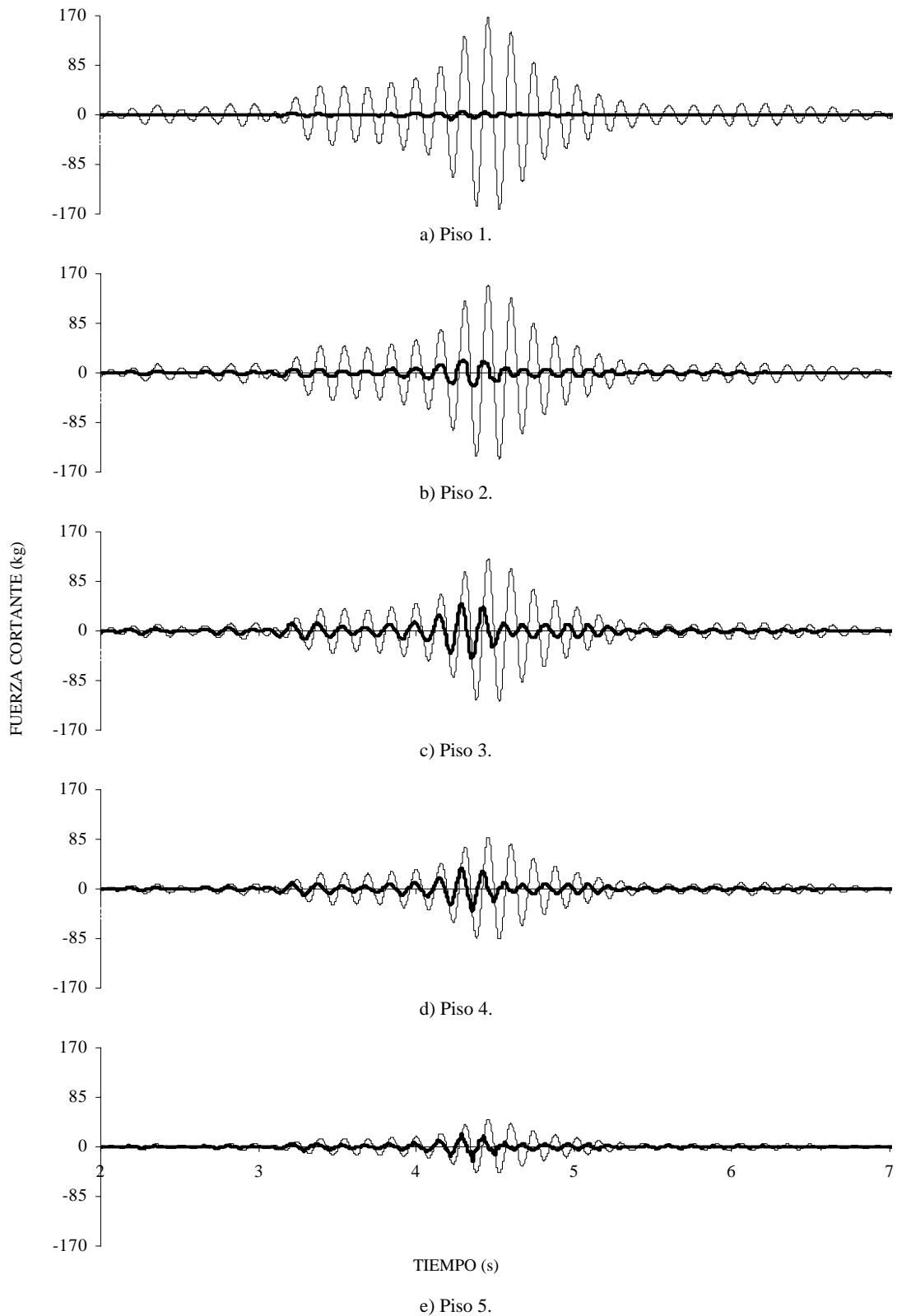


Figura 6.21. Historia de fuerzas cortantes de entrepiso del modelo en estado convencional y controlado, sometido al registro sísmico AX21. — convencional, — con 2 AMR semiactivos.

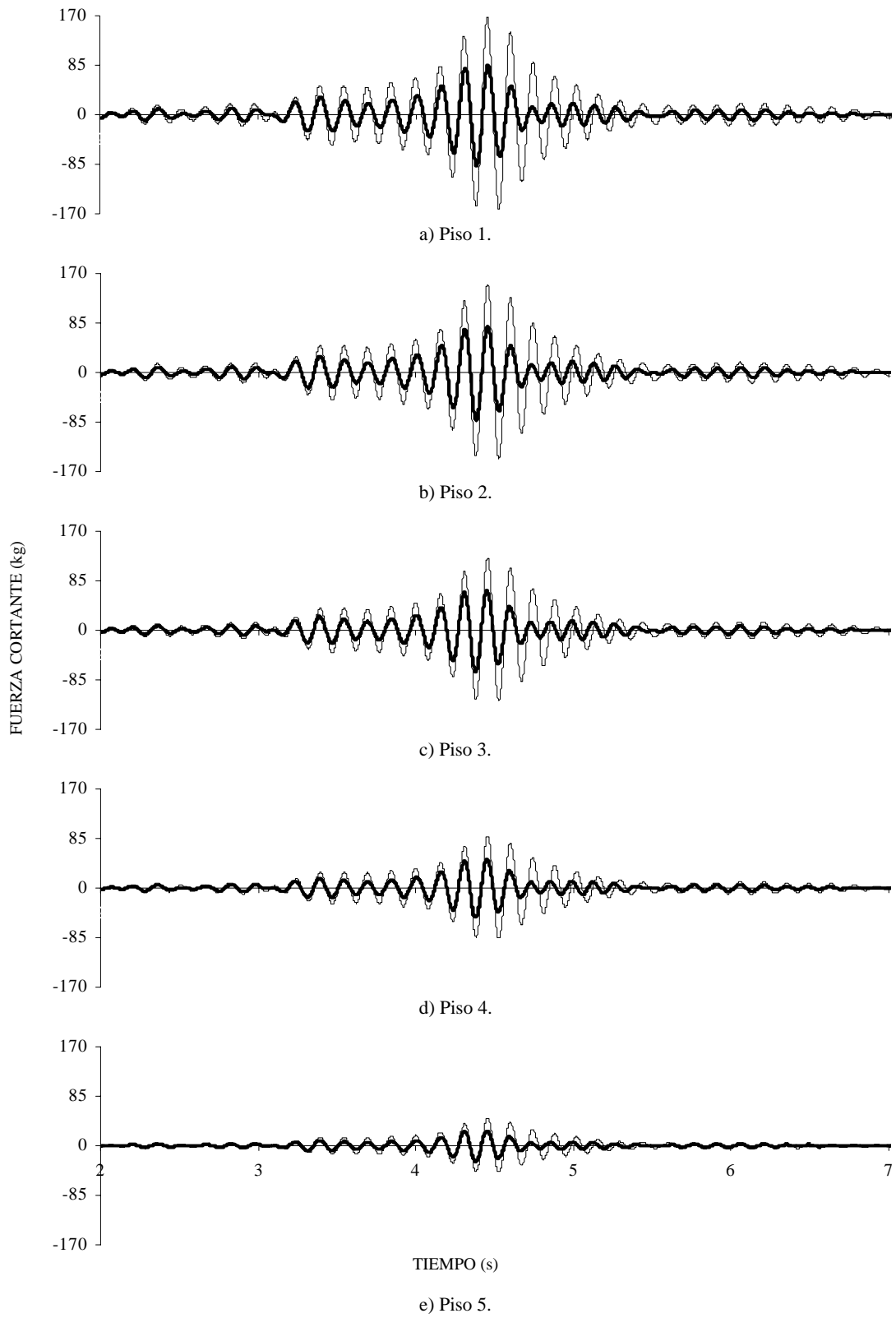
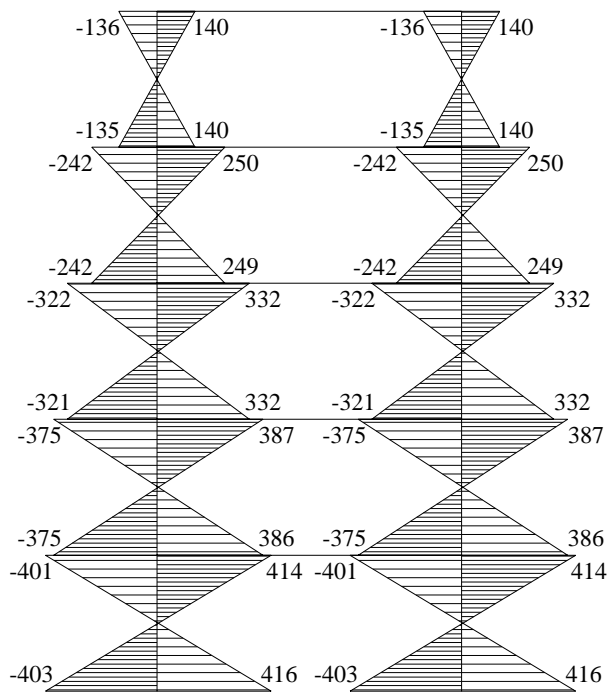
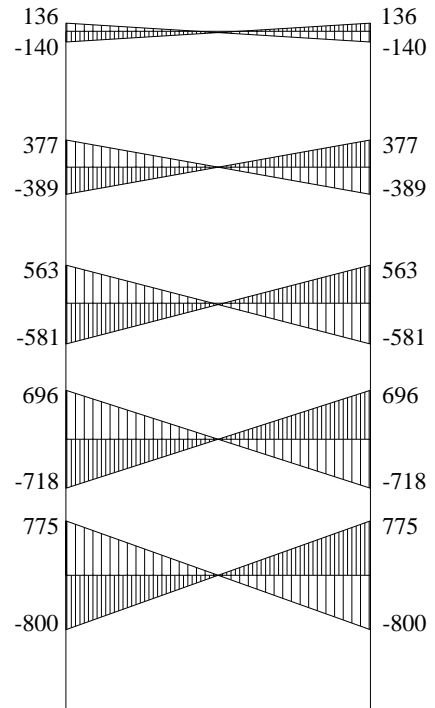


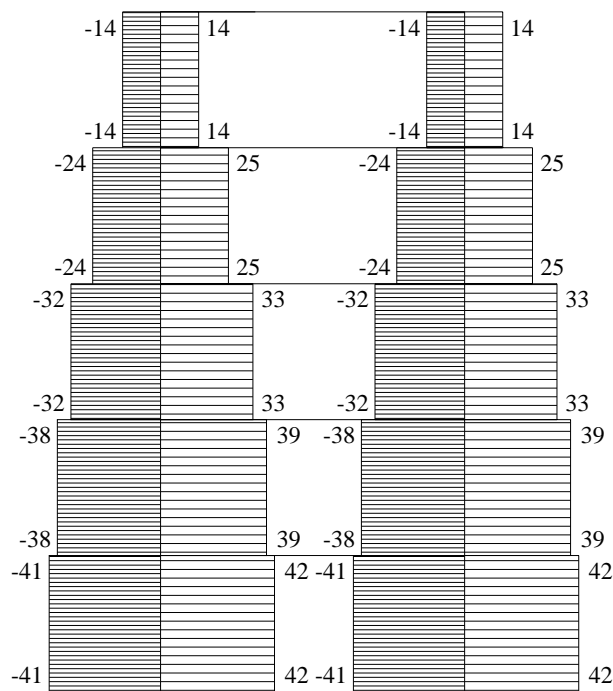
Figura 6.22. Historia de fuerzas cortantes de entrepiso del modelo en estado convencional y controlado, sometido al registro sísmico AX21. — convencional, — con 2 AMR pasivos.



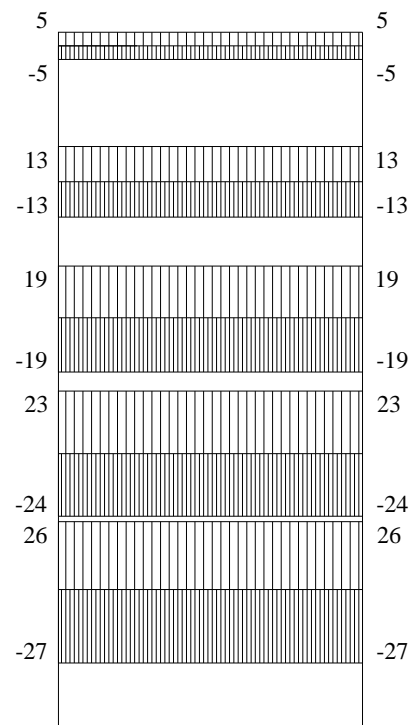
a) Momentos flexionantes en columnas.



b) Momentos flexionantes en vigas.



c) Fuerzas cortantes en columnas.



d) Fuerzas cortantes en vigas.

Figura 6.23. Envolventes de momentos flexionantes (kg cm) y fuerzas cortantes (kg) en los elementos estructurales del modelo convencional, sometido al registro sísmico AX21. (sin escala).

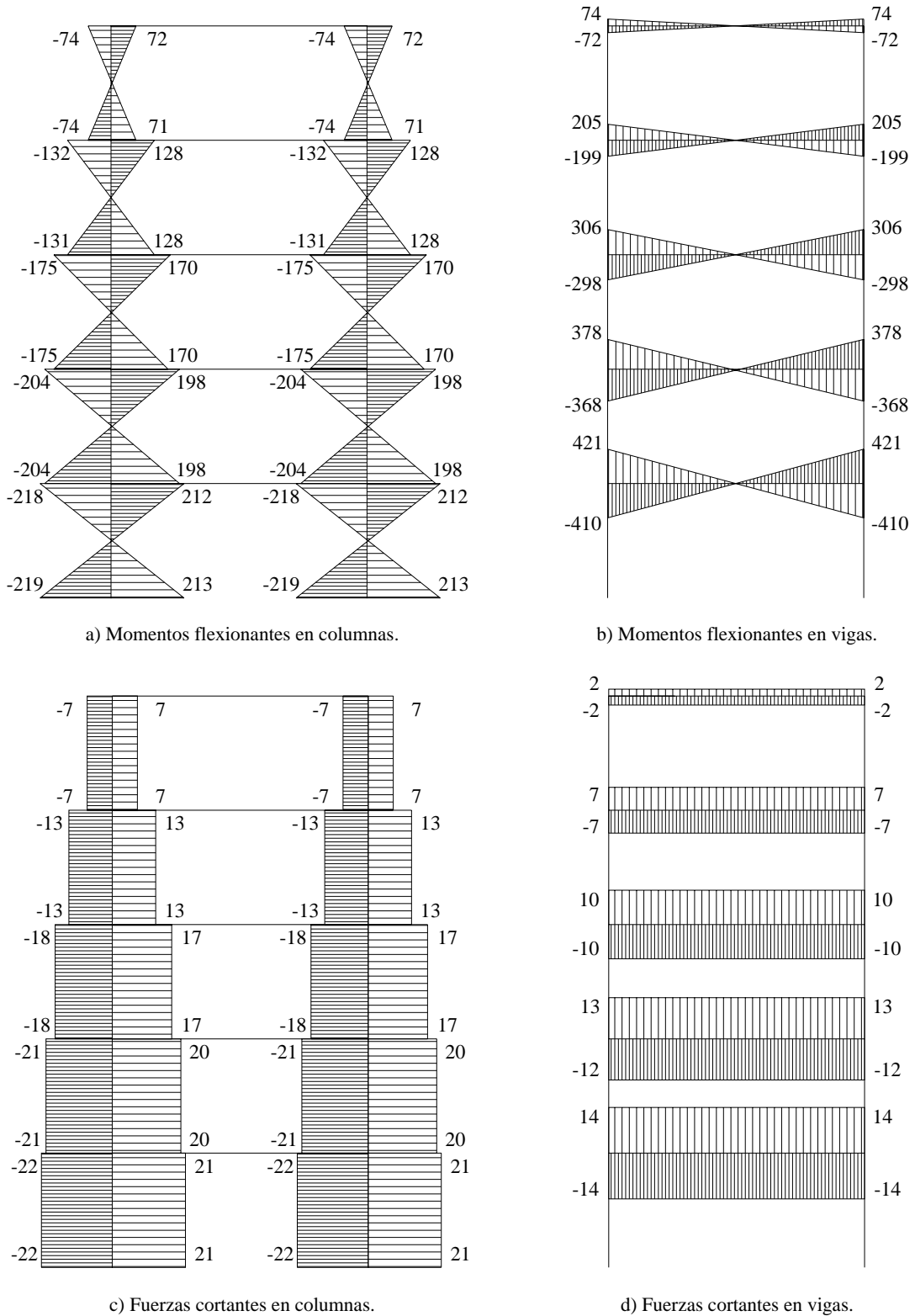
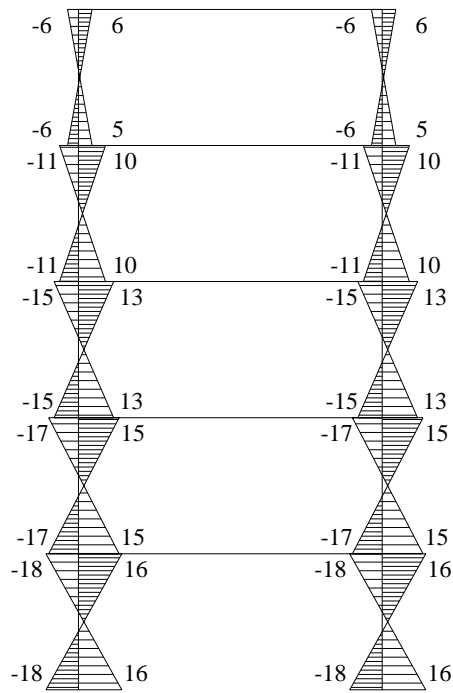
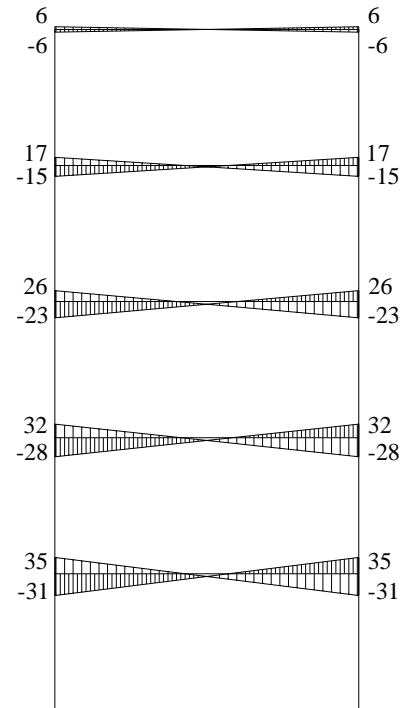


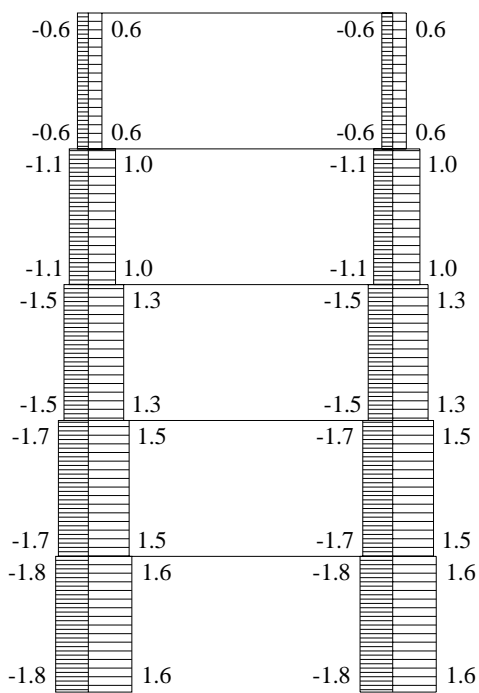
Figura 6.24. Envolventes de momentos flexionantes (kg cm) y fuerzas cortantes (kg) en los elementos estructurales del modelo controlado con 2 AMR pasivos, sometido al registro AX21. (sin escala).



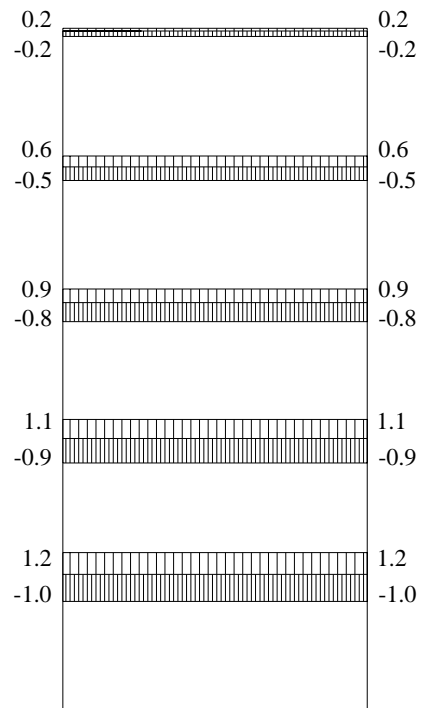
a) Momentos flexionantes en columnas.



b) Momentos flexionantes en vigas.



c) Fuerzas cortantes en columnas.



d) Fuerzas cortantes en vigas.

Figura 6.25. Envolventes de momentos flexionantes (kg cm) y fuerzas cortantes (kg) en los elementos estructurales del modelo controlado con 2 AMR semiactivos, sometido al registro AX21. (sin escala).

6.4 ESTRUCTURAS CONTROLABLES CON AMR

Con el objetivo de conocer qué tipo de estructuras son controlables con AMR en distintas clases de suelo, se estudió el comportamiento del marco de la Figura 4.8 con tres diferentes periodos fundamentales de vibrar, $T=0.5, 1$ y 2 s, controlado con un AMR semiactivo, sometido a tres eventos sísmicos en diferentes tipos de suelo. Debido a que la reducción en desplazamientos, fuerzas cortantes, aceleraciones, etc., de estructuras con el uso de AMR depende del tipo de estructura, en cuanto a su flexibilidad, y del tipo de suelo.

Los eventos sísmicos utilizados fueron los registrados el 19 de septiembre de 1985 en la ciudad de México en suelo blando, de transición y duro. Los registros sísmicos fueron: SCTew, registrado en suelo blando; estación de Viveros, componente Este-Oeste (VIVew), registrado en suelo de transición; y estación de Ciudad Universitaria, componente Norte-Sur (CUns), registrado en suelo duro. En la Figura 6.26 se muestran los espectros de respuesta de estos registros, calculados para 5% de amortiguamiento crítico.

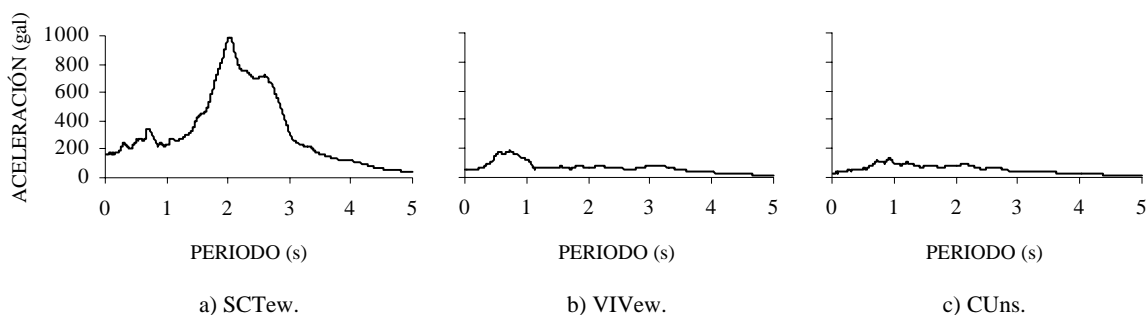


Figura 6.26. Espectros de respuesta de los registros sísmicos empleados, para un porcentaje de amortiguamiento respecto al crítico del 5%.

De igual forma que en el marco de la sección 4.3, se supuso que $\omega=0.5\text{Hz}$, $\xi=0.05$ y $k=100$ kg/cm. Se calcularon las historias de desplazamiento del sistema convencional (sin control) y controlado con AMR. Estas se presentan en las Figuras 6.27 a 6.29.

En la Tabla 6.8 se muestran los envolventes de desplazamientos del sistema de 1gdl obtenidos de las Figuras 6.27 a 6.29. Además, se muestra el porcentaje de reducción de desplazamientos que logra el AMR en el sistema en relación con el sistema convencional.

Tabla 6.8. Envolventes de desplazamientos (cm) del sistema de 1gdl sin control y con control activo, sometido a los sismos SCTew, VIVew y CUns.

T (s)	SCTew			VIVew			CUns		
	Sin control	Con AMR semiactivo	Reducción de respuesta (%)	Sin control	Con AMR semiactivo	Reducción de respuesta (%)	Sin control	Con AMR semiactivo	Reducción de respuesta (%)
0.5	1.6	0.1	92.2	0.9	0.1	93.0	0.4	0.03	90.5
1.0	6.0	5.1	15.3	3.1	1.6	49.1	2.4	0.2	91.3
2.0	98.5	63.3	35.8	7.2	4.7	35.0	7.7	5.0	35.1

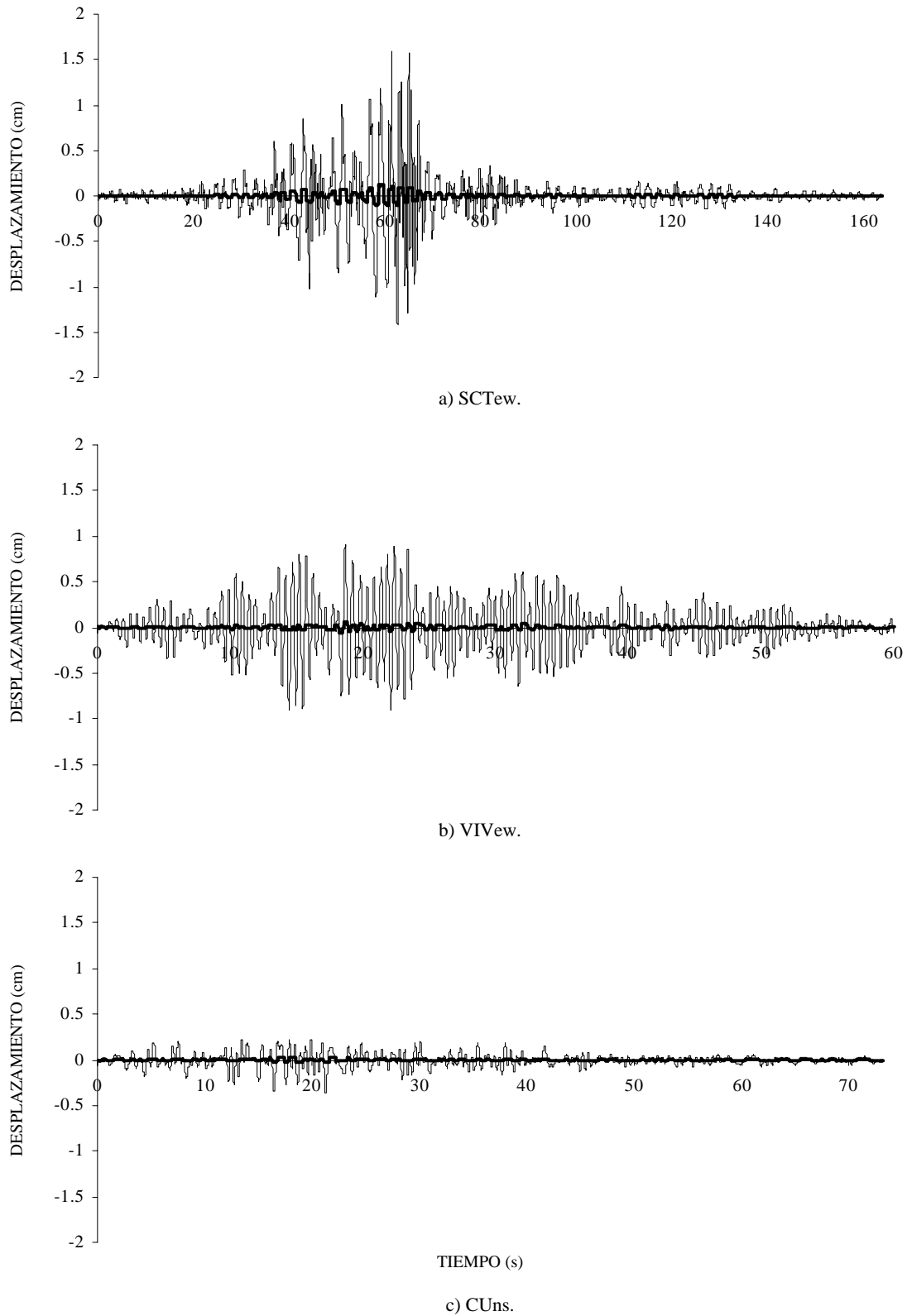


Figura 6.27. Desplazamientos del sistema de 1gdl con $T=0.5$ s, sometido a tres registros sísmicos.
 — sin control, — con AMR semiactivo.

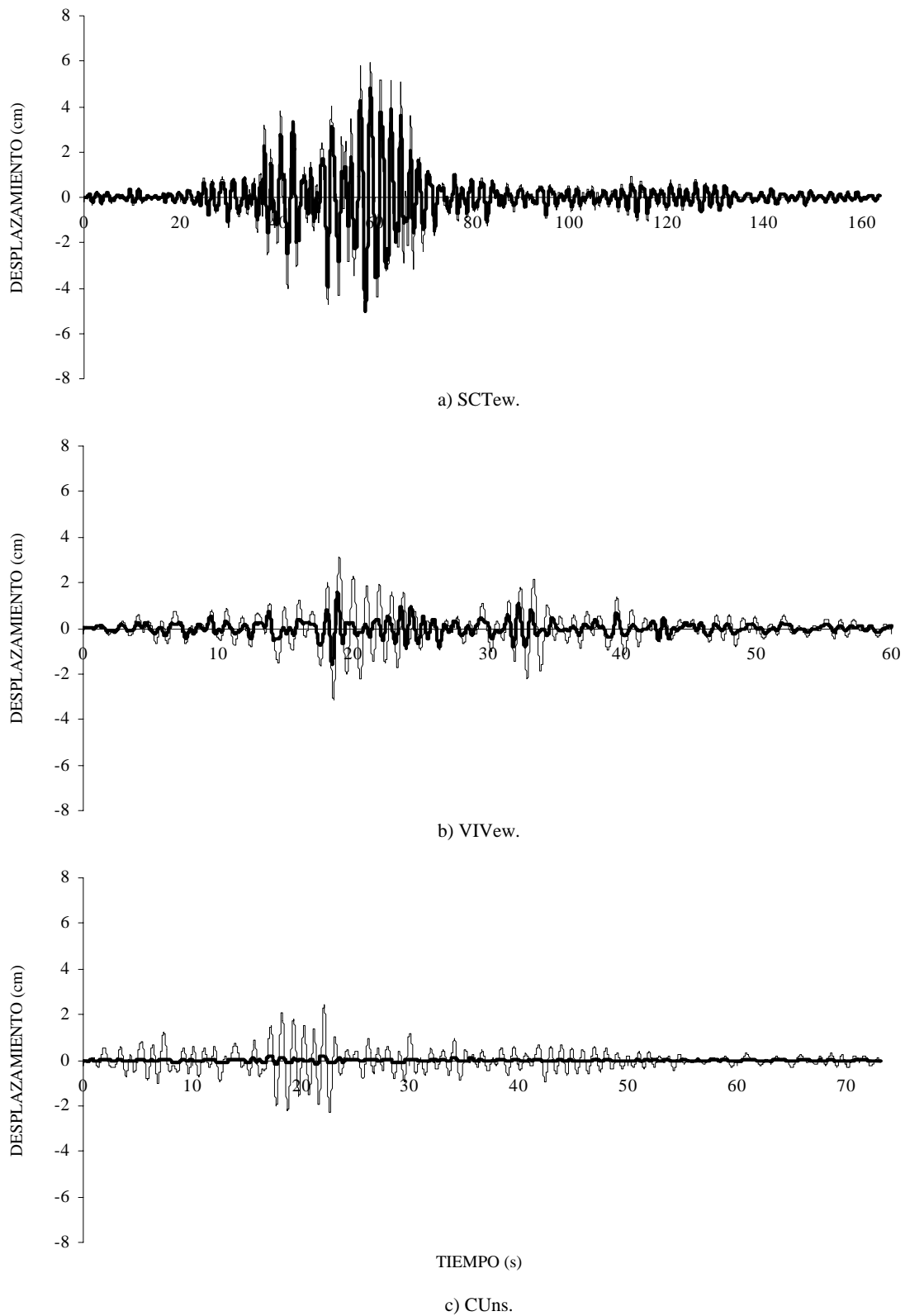


Figura 6.28. Desplazamientos del sistema de 1gdl con $T=1$ s, sometido a tres registros sísmicos.
 — sin control, — con AMR semiactivo.

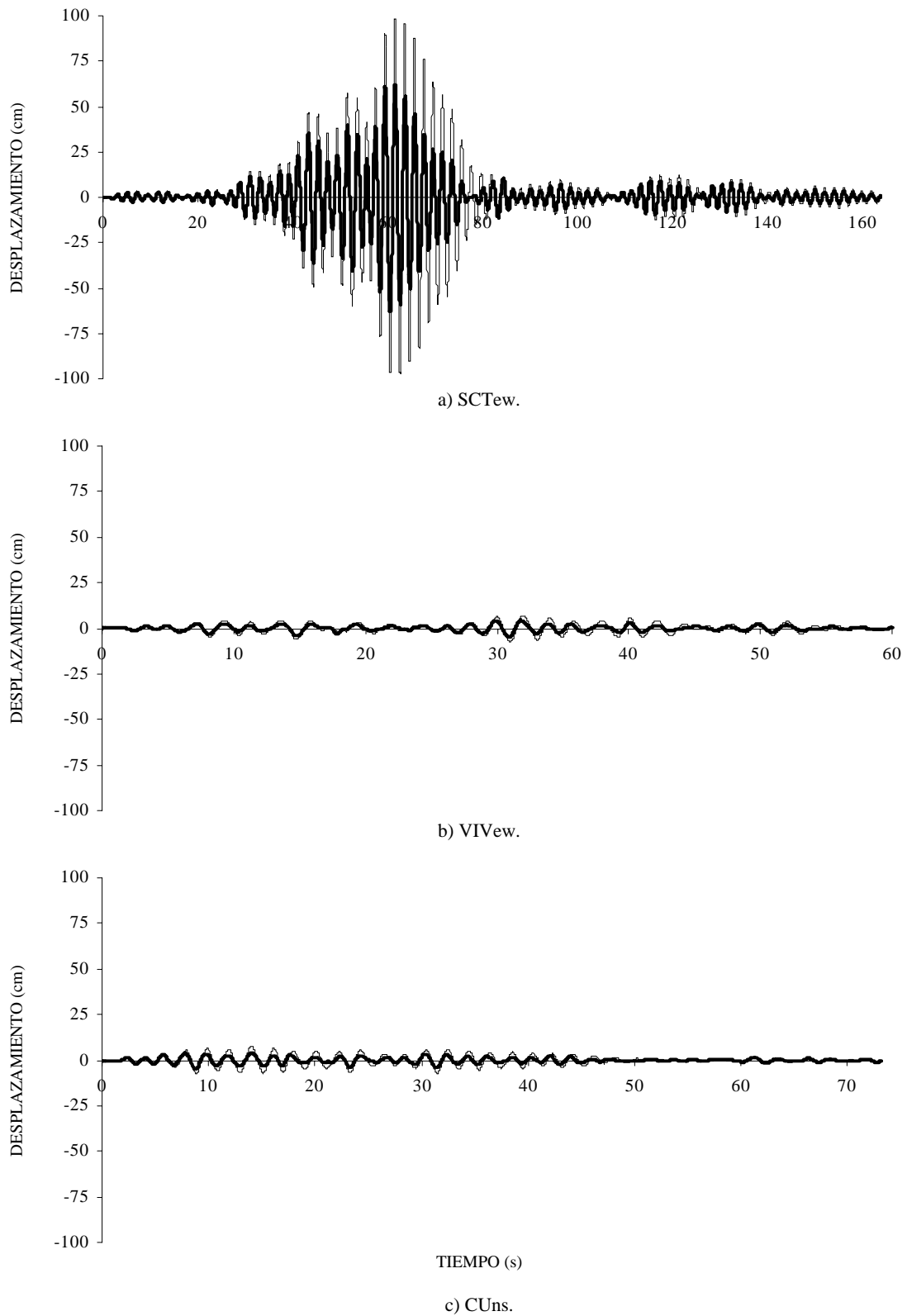


Figura 6.29. Desplazamientos del sistema de 1gdl con $T=2$ s, sometido a tres registros sísmicos.
 — sin control, — con AMR semiactivo.

Las estructuras con $T=0.5$ s desplantadas en los tres tipos de suelo, pueden ser controladas con el AMR, obteniendo reducciones en los desplazamientos de piso del orden de 92% (Tabla 6.8).

En la Figura 6.28.a se observa que en las estructuras con $T=1$ s desplantadas en suelo blando el AMR no logra reducciones significativas, en este caso de 15.3%. Para las estructuras desplantadas en suelo de transición (Figura 6.28.b) la reducción es de 49.1% y en suelo duro (Figura 6.28.c) de 91.3%. Por lo que se considera que el uso del AMR es efectivo (Tabla 6.8), aunque en este tipo de suelo las aceleraciones sísmicas son pequeñas comparadas con las que se presentan en suelo blando, y por lo tanto los desplazamientos de las estructuras convencionales no son muy grandes, el AMR es útil.

En la Figura 6.29 se aprecia que en las estructuras con $T=2$ s, el control con el AMR produce reducciones de desplazamientos de piso del orden del 35%.

En la Tabla 6.9 se muestran los envolventes de fuerza cortante basal del sistema de 1gdl y el porcentaje de reducción de estas que logra el AMR en el sistema en relación con el sistema convencional.

Los porcentajes de reducción obtenidos son los mismos que para los desplazamientos, ya que las fuerzas cortantes basales de sistemas estructurales con comportamiento elástico de 1gdl, son directamente proporcionales a sus desplazamientos.

Tabla 6.9. Envolventes de fuerzas cortantes basales (kg) del sistema de 1gdl sin control y con control activo, sometido a los sismos SCTew, VIVew y CUns.

T (s)	SCTew			VIVew			CUns		
	Sin control	Con AMR semiactivo	Reducción de respuesta (%)	Sin control	Con AMR semiactivo	Reducción de respuesta (%)	Sin control	Con AMR semiactivo	Reducción de respuesta (%)
0.5	159.7	12.5	92.2	90.2	6.3	93.0	36.6	3.5	90.5
1.0	596.4	505.3	15.3	311.4	158.5	49.1	241.4	20.9	91.3
2.0	9852.9	6325.5	35.8	721.3	468.8	35.0	768.4	498.7	35.1

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Se estudió el comportamiento de estructuras de edificios en las que se utilizan dispositivos de control, a base de amortiguadores magneto-reológicos, AMR, para controlar su respuesta sísmica. Estos amortiguadores se ubican dentro del grupo de sistemas de control semiactivo. Están constituidos por fluidos controlables capaces de cambiar sus características reológicas ante campos magnéticos permitiendo modificar las propiedades dinámicas de la estructura.

Es importante resaltar que el comportamiento de los AMR depende del voltaje suministrado. Estos pueden comportarse de una forma semiactiva, cambiando la resistencia al corte en cada instante de tiempo dependiendo del voltaje abastecido, y de una forma pasiva cuando el suministro de energía eléctrica es interrumpido. En este último caso resulta una reserva de capacidad de resistencia y en ningún momento cesa su función principal de disipar energía. Este amortiguador no desestabiliza estructuralmente al edificio puesto que no interviene en la masa y rigidez del sistema estructural.

Los valores de los parámetros y características del modelo matemático del AMR que se implantó en la estructura estudiada sólo son válidos para este tipo de amortiguador. Estos parámetros no pueden ser extrapolados a otros AMR con diferentes propiedades. En la literatura existen otros modelos matemáticos para representar el comportamiento de los AMR que contienen una gran cantidad de parámetros que deben ser ajustados con datos experimentales, lo que los hace poco prácticos. El modelo que se usó en el presente estudio se caracteriza por ser más simple que otros y por representar adecuadamente el comportamiento del AMR.

El diseño y construcción de estructuras con AMR acarrearía costos mayores a los generados si no se utilizara este dispositivo. En el momento en que la estructura sea sometida a un evento sísmico, se vería el beneficio del dispositivo, puesto que este lograría que se mantuviera en un intervalo de comportamiento elástico sin sufrir daños. En el caso de estructuras con diseño convencional, ante la presencia de un evento sísmico, se tiene la incertidumbre de daño de estas, lo cual acarrearía mayores costos en su reparación, o el colapso de las mismas.

En este trabajo se presentó una propuesta de diseño sísmico de estructuras con AMR. Esta consiste en analizar la estructura con la incorporación de estos amortiguadores. Se basa en disminuir el cortante basal de la estructura hasta un valor establecido con la incorporación de AMR en los pisos de la misma. La cantidad de AMR y su ubicación en el edificio se consiguen con un proceso iterativo que toma en cuenta las características de los AMR que serán utilizados y las propiedades de la estructura. El cortante basal que no logren disipar los AMR será con el que finalmente se diseñará la estructura.

Del estudio del modelo estructural de 5 pisos en estado convencional y controlado con un AMR en estado pasivo y semiactivo, se encontró que las reducciones de la respuesta con el AMR semiactivo, fueron importantes. La reducción de desplazamientos del modelo controlado semiactivamente respecto al convencional para el sismo más intenso fue de 61%, y de 50 y 43% en distorsiones y fuerzas cortantes de entrepiso, respectivamente. En estado pasivo, el AMR logró reducciones en desplazamientos, distorsiones y fuerzas cortantes de entrepiso, del orden de 23%. Los momentos y fuerzas cortantes de los elementos estructurales del primer entrepiso del marco controlado con el AMR semiactivo y pasivo, significaron un 62 y un 25%, respectivamente, de los obtenidos de manera convencional.

Al aplicar la propuesta de diseño sísmico de estructuras al modelo de 5 pisos estudiado, con el uso de 2 AMR ubicados en el primer y segundo entrepiso, se alcanzaron reducciones máximas del 96% en desplazamientos de piso, distorsiones de entrepiso y cortantes basales. Con el uso del AMR en estado

pasivo, estas respuestas tuvieron reducciones del 47%. Con el AMR semiactivo se lograron reducciones del orden del 96% en momentos flexionantes y fuerzas cortantes de los elementos estructurales del primer entrepiso, respecto al convencional. Con el AMR pasivo esta reducción fue del orden del 47%.

Se analizó y se discutió la respuesta estructural analítica, del modelo estructural con AMR en estado pasivo y en estado semiactivo, respecto al modelo sin control, sometido a excitaciones sísmicas intensas. Se comentó sobre la conveniencia del uso de estos dispositivos con el propósito de preservar el buen estado estructural de los edificios sometidos a fuertes movimientos sísmicos.

Se observó un mayor amortiguamiento crítico de la estructura cuando el AMR trabaja de manera semiactiva (16.3%), comparado con el del AMR pasivo y el del modelo convencional (4.3 y 2.8%, respectivamente).

Con el objetivo de conocer la efectividad de los AMR en estructuras con diferentes períodos fundamentales de vibración y desplantadas en diferentes tipos de suelo, se estudió la respuesta de 3 sistemas de 1gdl controlados con AMR. Estos sistemas tuvieron un periodo fundamental de vibración, $T=0.5$, 1 y 2 s. Se sometieron a eventos sísmicos registrados el 19 de septiembre de 1985 en la ciudad de México, en suelo blando, de transición y duro. Los resultados obtenidos muestran que los AMR son muy efectivos en las estructuras con $T=0.5$ s puesto que reducen los desplazamientos hasta 92% en los tres tipos de suelo. En el caso de estructuras con $T=2$ s los AMR en los tres tipos de suelo reducen la respuesta 35%, cifra que no es muy significativa. En las estructuras con $T=1$ s con los AMR en suelo blando alcanzaron reducciones del 15%, y en suelos de transición y duro, las reducciones ascendieron a 49 y 91%. En suelos de transición y duro los desplazamientos de las estructuras con diseño convencional son menores que los de suelo blando, a pesar de esto, el uso del dispositivo es útil.

El presente trabajo forma parte de estudios a corto plazo en el Instituto de Ingeniería, UNAM, sobre estructuras controlables con AMR, y asienta una base que puede ser utilizada para estudios futuros de control estructural.

Este dispositivo de control es un tema que no ha sido muy estudiado y tiene muy pocos antecedentes que respalden su uso en la práctica. Por lo tanto, es necesario ampliar los estudios analíticos y experimentales con amortiguadores que están disponibles comercialmente, especiales para estructuras. Además, estos estudios deberán abarcar la calibración de los parámetros que definen su comportamiento y que permitan incorporarlos en modelos estructurales a escala natural. Con base en los resultados de los estudios que se realicen, será posible plantear otras alternativas de diseño de edificios controlados, que puedan ser incorporadas en los reglamentos de diseño nacionales.

Para estudios subsecuentes de estructuras con este tipo de amortiguadores, se recomienda tomar en cuenta los efectos de torsión; incluir efectos P-Delta; verificar el comportamiento con sistemas estructurales que incluyan muros; e incluir los efectos de interacción suelo-estructura.

REFERENCIAS

- Álvarez L., y Jiménez F.R. (2003), "Semi-active control of civil structures using magnetorheological dampers", American Control Conference, Denver, Colorado, EUA, pp. 1428-1433.
- ATC-40 Applied Technology Council. (1996), "Seismic evaluation and retrofit of concrete buildings", Vol. 1, Reporte No. SSC 96-01.
- Bazán E., y Meli R. (2002), "Diseño sísmico de edificios", Limusa, México.
- Cahís X. (2000), "Desarrollo de un nuevo disipador de energía para diseño sismorresistente. Análisis numérico y validación experimental de su comportamiento", Tesis doctoral, Universitat Politècnica de Catalunya, Departament D'enginyeria de la Construcció, Barcelona, España.
- Canudas C., Olsson H., Åstrom K.J., y Lischinsky P. (1995), "A new model for control of systems with friction", IEEE Transactions on Automatic Control, Vol. 40, No. 3, pp. 419-425.
- Carlson J.D. (1994), "Magnetorheological fluids, ready for real-time motion control", Lord Corporation, Materials Division, Cary, Carolina del Norte, EUA.
- Carlson J.D. (2001), "What makes a good MR fluid?", 8th International Conference on Electrorheological (ER) Fluids and Magneto-rheological (MR) Suspensions, Nice, EUA.
- Carlson J.D., Catanzarite D.M., y St. Clair K.A. (1996), "Commercial magneto-rheological fluid devices", International Journal of Modern Physics, Vol. 10, No. 23 y 24, pp. 2857-2865.
- Carlson J.D., y Spencer B.F. (1996), "Magneto-rheological fluid dampers for semi-active seismic control", 3rd International Conference on Motion and Vibration Control, Chiba, Japón, Vol. 3, pp.35-40.
- Chen C.T. (1999), "Linear system theory and design", Oxford, EUA, 3a edición.
- Choi K., Cho S., Jung H., y Lee I. (2004), "Semi-active fuzzy control for seismic response reduction using magnetorheological dampers", Earthquake Engineering and Structural Dynamics, Vol. 33, pp. 723-736.
- Chopra A.K. (1995), "Dynamics of structures", Prentice Hall, EUA.
- CSI. (2004), "ETABS No lineal", Versión 7.24, Computers and Structures, Berkeley, California, EUA.
- Dyke S.J., Spencer B.F., Sain M.K., y Carlson J.D. (1996), "Seismic response reduction using magnetorheological dampers", IFAC World Congress, San Francisco, EUA.
- Dove R.C., y Bennett J.G. (1986), "Scale modeling of reinforced concrete category I structures subjected to seismic loading", Los Alamos National Laboratory, Los Alamos, Nuevo México 87545, NUREG/CR-4474, LA-10624-MS.
- Escobar J.A., Sánchez-Ramírez A.R., y Dyer J.N. (2002), "Study of the bending hysteretic behaviour of ductile steel plates for seismic energy dissipation", Canadian Journal of Civil Engineering, Vol. 29, pp. 853-862.

FEMA-356. (2000), "Prestandard and commentary for the seismic rehabilitation of buildings", ASCE & FEMA, Washington D.C., EUA.

Franklin G.F., Powell J.D., y Emami-Naeini A. (1994), "Feedback control of dynamic systems", Addison Wesley, EUA, 3a edición.

Grigoriu M., Ruíz S.E., y Rosenblueth E. (1988), "The Mexico earthquake of September 19, 1985—nonstationary models of seismic ground acceleration", *Earthquake Spectra*, Vol. 4, No. 3, pp. 551-568.

Healey T.J., y Sozen M.A. (1978), "Experimental study of the dynamic response of a ten-story reinforced concrete frame with a tall first story", University of Illinois at Urbana-Champaign, Illinois, EUA, Structural Research Series No. 450, Reporte No. UILU-ENG-78-2012, agosto.

Jiménez F.R. (2002), "Control semiactivo de estructuras civiles utilizando amortiguadores magneto-reológicos", Tesis de maestría, Posgrado UNAM, México.

Jiménez F.R. (2005), Comunicación personal.

Jiménez F.R., y Álvarez L. (2002), "Real time identification of structures with magnetorheological dampers", 41st IEEE Conference on Decision and Control, Las Vegas, Nevada, EUA.

Johnson E.A., Ramallo C.J., Spencer B.F., y Sain K.M. (1998), "Intelligent base isolation systems", Second World Conference on Structural Control, Kioto, Japón.

Kuo B.C. (1995), "Automatic control systems", Prentice Hall, EUA, 7a edición.

Kurata N., Kobori T., y Koshika N. (2002), "Performance-based design with semi-active structural control technique", *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, Vol. 31, pp. 445-458.

LORD Corporation. (2005) "Magneto-rheological (MR) technology", Materials Division, Cary, Carolina del Norte, EUA, www.mrfluid.com.

Martínez H.J. (2004), "Representación analítica del comportamiento histerético de materiales no lineales homogéneos e isotropos", Tesis de maestría, Posgrado UNAM, México.

Nishitani A., e Inoue Y. (2001), "Overview of the application of active/semiactive control to building structures in Japan", *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, Vol. 30, pp. 1565-1574.

NTC-Sismo. (2004), "Normas Técnicas Complementarias para Diseño por Sismo del Reglamento de Construcciones del Distrito Federal", Gaceta Oficial del Gobierno del Distrito Federal, México, octubre.

Ogata K. (1997), "Modern control engineering", Prentice Hall, EUA, 3a edición.

Qing S., Ling Z., Jinxiong Z., y Qingxuan S. (2003), "Experimental study of the semi-active control of building structures using the shaking table", *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, Vol. 32, pp. 2353-2376.

Ramallo C.J., Johnson E.A., y Spencer B.F. (2002), " 'Smart' base isolation systems", *ASCE Journal of Engineering Mechanics*.

- Rabinow J. (1948), "The magnetic fluid clutch", AIEE Transactions, Vol. 67, pp. 1308-1315.
- Ramberg W., y Osgood W.R. (1943), "Description of stress-strain curves by three parameters", Technical Note 902, National Advisory Committee for Aeronautics.
- Sain P.M., Sain M.K., y Spencer B.F. (1997), "Models for hysteresis and application to structural control", American Control Conference, junio, pp. 16-20.
- Soong T.T., y Spencer B.F. (2002), "Supplemental energy dissipation: state-of-the-art and state-of-the-practice", Engineering Structures, Vol. 24, pp. 243-259.
- Spencer B.F., Carlson J.D., Sain M.K., y Yang G. (1997), "On the current status of magnetorheological dampers: seismic protection of full-scale structures", American Control Conference, Albuquerque, Nuevo México, EUA, pp. 458-462.
- Spencer B.F., Dyke S.J., Sain M.K., y Carlson J.D. (1996a), "Idealized model of a magnetorheological damper", 12th Conference on Analysis and Computation, Chicago, Illinois, EUA, pp.361-370.
- Spencer B.F., Dyke S.J., Sain M.K., y Carlson J.D. (1996b), "Phenomenological model of a magnetorheological damper", ASCE Journal of Engineering Mechanics, Vol 123, No. 3, pp. 230-238.
- Spencer B.F., y Sain M.K. (1997), "Controlling buildings: a new frontier in feedback", Special Issue of the IEEE Control Systems Magazine on Emerging Technology, diciembre, Vol. 17, No. 6, pp. 19-35.
- Spencer B.F., Yang G., Carlson J.D., y Sain M.K. (1998), "Smart, dampers for seismic protection of structures: a full-scale study", Second World Conference on Structural Control, Kioto, Japón.
- Srinivasan A.V., y McFarland D. (2001), "Smart structures, analysis and design", Cambridge University Press, Gran Bretaña.
- Symans D.M., y Constantinou C.M. (1997), "Seismic testing of a building structure with a semi-active fluid damper control system", Earthquake Engineering and Structural Dynamics, Vol. 26, pp. 759-777.
- The MathWorks, Inc. (2002a), "MATLAB® El lenguaje de computación técnica", Versión 6.5 Release 13, www.mathworks.com.
- The MathWorks, Inc. (2002b), "SIMULINK® Simulación y diseño de modelos de sistemas", Versión 5 Release 13, www.mathworks.com.
- Winslow W.M. (1949), "Induced vibration of suspensions", Journal of Applied Physics, Vol. 20, pp. 1137-1140.
- Xu Y.L., Qu W.L., y Ko J.M. (2000), "Seismic response control of frame structures using magnetorheological/electrorheological dampers", Earthquake Engineering and Structural Dynamics, Vol. 29, pp. 557-575.
- Yang G. (2001), "Large-scale magnetorheological fluid damper for vibration mitigation: modeling, testing and control", Tesis doctoral, Department of Civil Engineering and Geological Sciences, Universidad de Notre Dame, Indiana, EUA.